

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет інформатики та обчислювальної техніки  
Кафедра автоматики та управління в технічних системах**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Олександр РОЛІК

«\_\_»\_\_\_\_\_20\_\_ р.

**Дипломний проєкт**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютеризовані системи управління»  
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»  
на тему: «Автоматизована система керування швидкістю електромобіля»**

Виконала:

Студентка IV курсу, групи ІА-61

Висоцька Юлія Русланівна \_\_\_\_\_

Керівник:

Доцент кафедри АУТС, к.т.н., доцент

Репнікова Наталія Борисівна \_\_\_\_\_

Рецензент:

Доцент кафедри АСОіУ, к.т.н., доцент

Жданова Олена Григорівна \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цьому дипломному  
проєкті немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.

Студентка \_\_\_\_\_

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Факультет інформатики та обчислювальної техніки**  
**Кафедра автоматики та управління в технічних системах**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютеризовані системи управління»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Олександр РОЛІК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проєкт студенту**

**Висоцькій Юлії Русланівні**

1. Тема проєкту «Автоматизована система керування швидкістю електромобіля», керівник проєкту Репнікова Наталія Борисівна к.т.н, доцент затверджені наказом по університету від «\_07\_» \_травня\_ 2020р. №1081-с.

2. Термін подання студентом проєкту 9 червня 2020 року

3. Вихідні дані до проєкту електромобіль Tesla Model X, розгін до 100 км – 5 с, дальність ходу 400 км, ємність акумулятора 100 кВт·год, потужність електродвигуна – 193136 Вт, ККД двигуна – 92%, цифровий регулятор, перерегулювання 0%, помилка 0, час перехідного процесу 1.2 секунди.

4. Зміст пояснювальної записки: огляд існуючих рішень, розроблення схеми електричної структурної, розроблення схеми електричної функціональної, розроблення математичної моделі, синтез цифрових регуляторів, реалізація регулятора у вигляді програми контролера

5. Перелік графічного матеріалу: схема електрична структурна, схема електрична функціональна, схема часових характеристик, схема системи автопілотування .

6. Дата видачі завдання 30 квітня 2020 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Огляд існуючих рішень	30.04.20 – 03.05.20	
2	Розроблення схеми електричної структурної	03.05.20 – 09.05.20	
3	Розроблення схеми електричної функціональної	09.05.20 – 12.05.20	
4	Розроблення математичної моделі	12.05.20 – 17.05.20	
5	Аналіз результатів моделювання	17.05.20 – 20.05.20	
6	Розроблення цифрового регулятора	20.05.20 – 24.05.20	
7	Оформлення текстової документації	24.05.20 – 01.06.2020	

Студент

Юлія ВИСОЦЬКА

Керівник

Наталія РЕПНІКОВА

## АНОТАЦІЯ

Висоцька Ю. Р. Автоматизована система керування швидкістю електромобіля. КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2020.

Проект містить 73 с. тексту, 29 рисунків, 1 таблиця, посилання на 22 літературні джерела, 3 додатки та 4 конструкторських документів.

Ключові слова: електромобіль, безпілотний автомобіль, система керування, система автопілот, швидкість руху, електродвигун.

Об'єктом дослідження є електромобіль.

Метою дослідження є забезпечення комфортності руху електромобіля при змінних умовах дорожньої обстановки.

У дипломному проєкті розроблено цифрову модель системи керування швидкістю електромобіля з низьким ступенем мотиваційного сприйняття дорожньої ситуації. Система забезпечує комфортність руху електромобіля при змінних умовах дорожньої обстановки за рахунок стабілізації швидкості руху. Розроблено структурну та функціональну схеми, розроблено математичну модель. Для забезпечення заданої швидкості руху розроблено цифровий регулятор за методом бажаних передавальних функцій замкнутої системи.

Отримані результати можуть бути корисними при автоматизації систем керування електромобілем та при подальшому розвитку безпілотних автомобілів.

## ANOTATION

Vysotskaya Y. R. Automatic control system of speed of electric car. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, 2020.

The project contains 73 p. text, 29 figures, 1 table, references to 22 literature sources, 3 annexes and 4 design documents.

Keywords: electric car, self-driving vehicle, control system, autopilot system, speed, electric motor.

The object is an electric car.

The method of maintenance is the guaranteed comfort of the electric car in depends of road conditions.

In the diploma project the digital model of control system of speed of the electric car with low degree of motivational perception of a road situation is developed. The system provides comfort of movement of the electric car at changing conditions of a road situation due to stabilization of speed of movement. The structural and functional schemes are developed, the mathematical model is developed. To ensure a given speed, a digital controller has been developed by the method of the desired transfer functions of a closed system.

The obtained results can be useful in the automation of electric vehicle control systems and in the further development of unmanned vehicles.

**Пояснювальна записка  
до дипломного проєкту  
на тему: «Автоматизована система керування  
швидкістю електромобіля»**

Київ – 2020 року

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 АНАЛІЗ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ .....	6
1.1 Загальні відомості .....	6
1.2 Огляд існуючих рішень побудови системи керування електромобілем..	11
2 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ .....	18
2.1 Опис роботи та аналіз основних елементів структурної схема автоматизованої системи керування швидкістю електромобіля .....	18
3 РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ .....	24
4 РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ЦИФРОВОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ.....	28
4.1 Виведення математичної моделі об'єкту управління .....	28
4.2 Виведення передавальної функції автоматизованої системи керування швидкістю електромобіля .....	29
4.3 Розроблення моделі досліджуваної системи в прикладному пакеті MathLab Simulink. ....	35
4.4 Розроблення цифрової моделі досліджуваної моделі. ....	36
5 АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ І ЯКОСТІ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ .....	42
5.1 Аналіз стійкості системи.....	42
5.2 Аналіз якості системи.....	46

					<i>ІА61050БАК 005 П.З</i>			
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизована система керування швидкістю електромобіля Пояснювальна записка			
Розробив	Висоцька							
Перевірив	Репнікова							
Н. контр.								
Затвердив								
					Літ.	Аркуш	Архив	
						2	69	
					«КПІ ім. І. Сікорського» ФІОТ Група ІА-61			

6 СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА .....	50
6.1 Синтез цифрового регулятора методом вибору бажаних передавальних функцій.....	50
6.2 Синтез цифрового ПД-регулятора.....	54
7 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА .....	58
7.1 Метод безпосередньої декомпозиції.....	58
7.2 Дослідження розробленого цифрового регулятора за допомогою мови програмування ST в середовищі CodeSYS .....	60
ВИСНОВОК.....	62
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	63
Додаток А.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>



## ВСТУП

Нині практично 80% світового автомобільного ринку прямує до заборони вуглеводного пального і переходу на електромобілі та гібриди. Революція у світі машинобудування відбулась лише тоді, коли відбувся старт продажів першого комерційного преміального седана Tesla Model S. Користувачі високо оцінили безшумний, швидкий і комфортний автомобіль. Однак не лише екологічність приваблює до себе користувачів. Система автопілот, яка допомагає водієві на дорозі, є новаторською та прогресивною не лише через технологічні рішення, а й через доведену безпечність такого автотранспорту. Система допомагає регулювати швидкість, самостійно тримає смугу та дотримується усіх правил дорожнього руху.

Мета даного проєкту – забезпечення комфортності руху електромобіля при змінних умовах дорожньої обстановки.

Ця система має забезпечити плавну зміну швидкості руху зважаючи на дорожні умови. Система може використовуватись в подальшому для удосконалення систем автопілотування та для систем безпілотних транспортних засобів.

Для виконання поставленої мети були поставлені та виконані наступні задачі:

- розроблення математичної цифрової моделі об'єкта керування;
- аналіз стійкості та показників якості системи;
- синтез цифрового регулятора;
- розробка програми цифрового регулятора;
- експериментальні дослідження ефективності розробленої системи;

В роботі були використані наступні методи дослідження:

- z-перетворення, для отримання цифрової системи управління швидкістю електромобіля;
- синтез цифрового регулятора, застосовуючи метод заснований на виборі бажаних передавальних функцій та методів розроблення ПІД-

					ІА61.050БАК.005 ПЗ	Аркш
						4
Зм.	Аркш	№ докум.	Підпис	Дата		

регуляторів;

– програмування регулятора за допомогою метода безпосередньої декомпозиції.

Об'єкт дослідження – електромобіль.

Предмет дослідження – автоматизована система керування швидкістю електромобіля базуючись на даних навколишнього світу.

					ІА61.050БАК.005 ПЗ	Аркцш
						5
Зм.	Аркцш	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 АНАЛІЗ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

## 1.1 Загальні відомості

В останні роки автомобільна промисловість протерпіла більше змін чим за останнє десятиліття. На сьогодні світова промисловість в пошуках альтернативних джерел енергії на заміну вуглеводному паливу. І електромобіль є одним з найкращих варіантів.

Електромобіль – це автомобіль, який працює на електричному двигуні. Так, зараз електромобілі, які поки є лише приватним видом транспорту, використовуються для перевезення людей у містах, лісових зонах та зонах відпочинку. Тобто використовується в місцях, де питання екологічного використання транспортних засобів стоїть дуже гостро.

Україна увійшла у топ-5 країн за динамікою розвитку ринку електромобілів, поступившись Норвегії, Швеції та Ісландії. За останні дев'ять років загальна кількість електромобілів в Україні з нуля досягла позначки у більше ніж 10000 одиниць [1].

Як було зазначено вище, усі електромобілі мають електродвигун замість двигуна внутрішнього згорання. Електромобіль використовує великий тяговий акумулятор для живлення двигуна і він має бути підключеним до зарядної станції чи до розетки. Також, так як він працює на електроенергії то в конструкції він не має таких типових компонентів для рідкого пального як паливна помпа, магістраль та бак. Типова структура електромобіля представлена на рисунку 1.1.

					IA61.050BAK.005 ПЗ	Архив
						6
Зм.	Архив	№ докум.	Підпис	Дата		

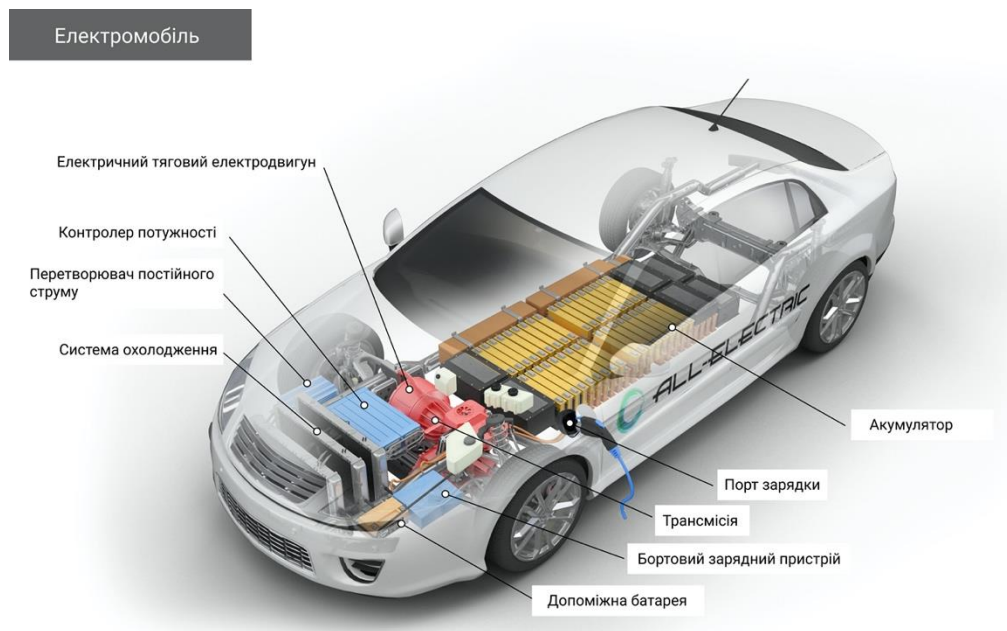


Рисунок 1.1 – Схема розміщення ключових елементів електромобіля [2]

У електромобілі допоміжна акумуляторна батарея забезпечує електроенергією допоміжні системи автомобіля. Порт зарядки дозволяє під'єднати автомобіль до зовнішнього джерела живлення для зарядки тягової акумуляторної батареї.

Перетворювач постійного струму перетворює постійний струм високої напруги з тягової акумуляторної батареї в постійний струм низької напруги, необхідний для запуску допоміжних систем автомобіля і зарядки допоміжної акумуляторної батареї.

Використовуючи живлення від тягової акумуляторної батареї, електричний тяговий електродвигун управляє колесами автомобіля. У деяких автомобілях використовуються мотор-генератори, що виконують як функції приводу, так і функції регенерації.

Бортовий зарядний пристрій приймає на вхід змінний електричний струм, який надходить через порт зарядки, і перетворює його в постійний струм для зарядки тягової акумуляторної батареї. Під час зарядки зарядний пристрій стежить за такими характеристиками акумулятора, як напруга, струм, температура і стан заряду.

Контролер потужності управляє потоком електричної енергії, що

передається від акумулятора, контролює швидкість електродвигуна і крутильний момент, який він виробляє.

Система охолодження підтримує необхідний діапазон робочих температур електродвигуна, силової електроніки та інших компонентів.

Акумулятор зберігає електроенергію для двигуна.

Трансмсія передає механічну потужність від двигуна до приводу коліс.

Основними перевагами електромобілів є:

- зниження витрат на транспортування вантажів і пасажирів – заряджати автомобіль електроенергією значно дешевше ніж заправляти бензином чи газом;
- більш ефективне використання пропускну здатності доріг шляхом централізованого управління транспортним потоком;
- довготривалий термін користування – повна деградація батареї в електромобілі відбувається значно пізніше чим ламається двигун внутрішнього згорання;
- розширення можливостей використання автомобіля для людей з обмеженими можливостями;
- при використанні системи автопілот – мінімізація ДТП і числа людських жертв в них;
- для безпілотних автомобілів можливість перевезення вантажів в небезпечних зонах, під час природних і техногенних катастроф або військових дій;
- фінансові пільги для стимулювання розвитку галузі електричного транспорту – в багатьох країнах світу на дорогах для електромобілів виділяють окрему смугу чи дають певні знижки при покупці. В Україні також є такий законопроект [3].

Не зважаючи на велику кількість позитивних моментів у користування електромобілів, існує ряд певних недоліків, які з часом мають бути виправленими.

Одним з основних недоліків є висока ціна на електромобілі. Перш за все,

					ІА61.050БАК.005 ПЗ	АДКУШ
						8
Зм.	Аркцш	№ докум.	Підпис	Дата		

для того щоб забезпечити електромобіль енергією для певного запасу ходу використовуються недешеві літій-іонні акумулятори, яких для забезпечення та підтримання достатнього рівня енергії для всіх систем електромобіля потрібно дуже багато. Наприклад, для забезпечення енергією електромобіль Tesla Model S використовуються 15 блоків, в яких 6 груп по 74 маленьких елементів у вигляді циліндричних капсул – літій-іонних осередків Panasonic 18650 вагою 46 грамів. Розташування осередків та блоків зображено на рисунку 1.2.

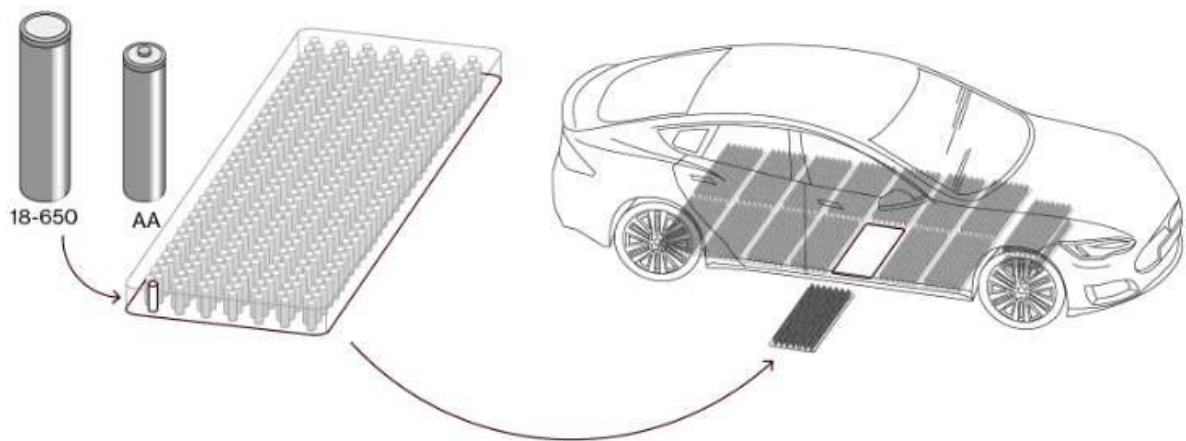


Рисунок 1.2 – Використання літій-іонних осередків Panasonic 18650 в автомобілі Tesla Model S [4]

По-друге, для розробки нових технологій потрібно дуже багато коштів. Що також включається в первинну ціну на автомобіль. Також недоліками для користування електромобілем в Україні є відсутність офіційних дилерських центрів та точок обслуговування електромобілів.

Але все ж в електромобілях є безперечно більше позитивних моментів ніж у автомобілів на двигуні внутрішнього згорання:

- електродвигуни мають більший коефіцієнт корисної дії (ККД) до 90-95%, в порівнянні з 22-42% у ДВС;
- електромобілю не потрібні такі елементи звичайного автомобіля як коробка передач, карданна передача, диференціал;
- електромобіль дуже швидко розганяється (доказом цього є

випробування на 100 км, які всі електромобілі проходять в середньому за 5-7 с) і може довго тримати високу швидкість;

- за допомогою рекуперативного гальмування можна підряджати акумулятор;

- простота техобслуговування і великий пробіг між сервісними техоглядами, а отже повільніший час зносу деталей.

З огляду на переваги електромобіля швидко зростає кількість компаній які займаються його розробкою. В 2011 році розвитком електромобілів займались лише компанії Tesla, Renault, Mitsubishi і Nissan. Але уже сьогодні 90% автовиробників представляють свої модельні ряди електромобілів на одному рівні з автомобілями на двигуні внутрішнього згорання. А комерційні компанії такі як Google, Waymo, Aptiv та Яндекс займаються розробкою безпілотних автомобілів на базі електромобілів.

На сьогодні активною розробкою електромобілів займаються компанії – Ford (Ford Ecostar – максимальна швидкість 180 км/год, максимальний пробіг на одній зарядці 70-80 км); Volkswagen (електричні версії моделей Golf, Jetta та модель CityStromer максимальна швидкість 100 км/год, максимальний пробіг на одній зарядці 50-90 км); Renault (Clio Electrique максимальна швидкість 100 км/год, максимальний пробіг на одній зарядці 100 км); Porsche (Taycan – максимальна швидкість 260 км/год, максимальний пробіг на одній зарядці 450 км); BMW (i8 Roadster – максимальна швидкість 250 км/год, максимальний пробіг на одній зарядці – 440 км) [5-8].

Однак нині електромобілі стали звичною ситуацією на дорогах. Вони вирішують завдання поліпшення екологічного стану, але не можуть зменшити кількість ДТП на дорогах зроблених через людський фактор. Недотримання швидкісного режиму чи неуважність на дорозі можуть забрати багато життів. Для розв'язання цієї проблеми все частіше і частіше в електромобілях використовують систему автопілот для уникнення небезпечних ситуацій на дорозі.

					IA61.050BAK.005 ПЗ	Аркш
						10
Зм.	Аркш	№ док.м.	Підпис	Дата		

## 1.2 Огляд існуючих рішень побудови системи керування електромобілем

Для вирішення проблеми великої кількості ДТП на дорозі було створено систему автопілот, яка базується на обчисленні стану автомобіля в просторі та прийнятті рішень щодо не критичних ситуацій (таких як дотримання смуги, рух з постійною швидкістю, тощо).

Технології безпілотного автомобіля, які використовуються в електромобілях з системою автопілот, дозволяють симулювати присутність людини на рівні прийняття рішень про вибір швидкості або руління. Цей вибір забезпечується завдяки набору камер, лідарів, радарів, сенсорів та інших систем визначення положення у просторі. Розташування цих систем зображено на рисунку 1.3.

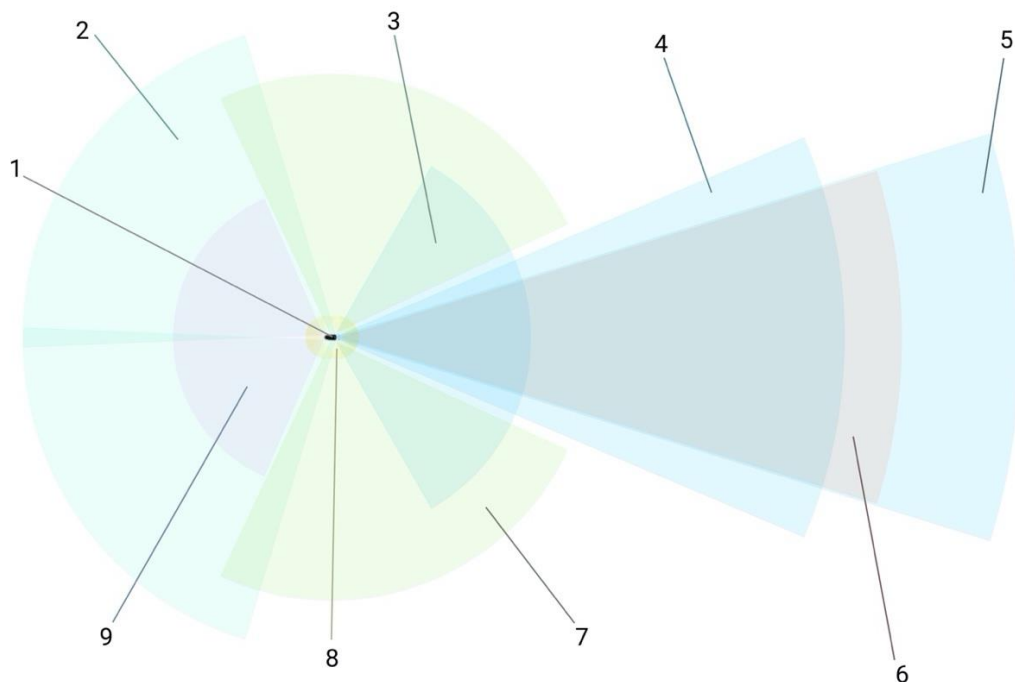


Рисунок 1.3 – Розташування систем визначення положення у просторі та радіус їх дії на прикладі електромобіля Tesla (1 – електромобіль;  
2 – бічні камери заднього виду (максимальна дистанція – 100 м);  
3 – передня ширококутна камера (максимальна дистанція – 60 м );  
4 – основна ширококутна камера (максимальна дистанція – 150 м);



- 5 – передня вузькокутна камера (максимальна дистанція – 250 м);  
 6 – радар (максимальна дистанція – 160 м); 7 – бічні камери з видом уперед (максимальна дистанція – 80 м); 8 – сонари (максимальна дистанція – 8 м);  
 9 – камери заднього виду (максимальна дистанція – 50 м) [9]

Дані з системи визначення положення у просторі потрапляють до самої системи автопілот. Типову архітектуру системи автопілотування в електромобілях можна побачити на рисунку 1.4 та розгорнутий вигляд на кресленіку ІА61.050БАК Д2.

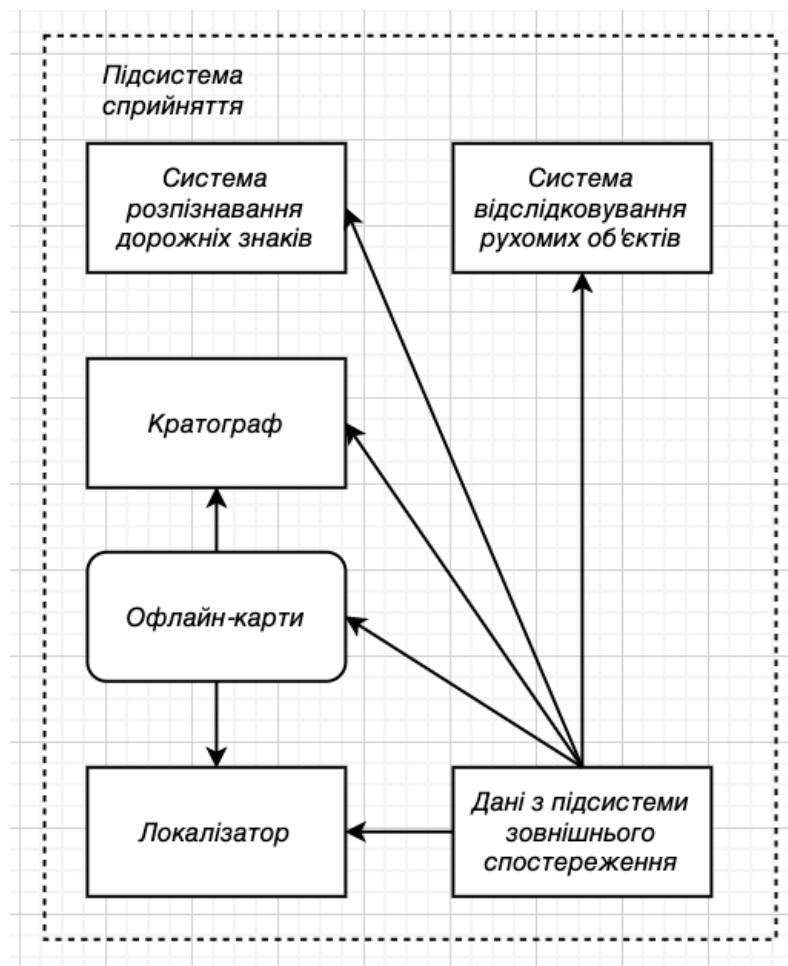


Рисунок 1.4 – Типова ієрархічна архітектура підсистеми прийняття рішень в системі автопілотування в електромобілях

Для того, щоб орієнтувати автомобіль у навколишньому середовищі, підсистема прийняття рішень повинна знати, де в ній знаходиться безпілотний

автомобіль.

Підсистема Локалізатор (рисунок 1.4) відповідає за оцінку стану автомобіля (лінійні швидкості, кутові швидкості тощо) стосовно статичних карт середовища. Ці статичні карти або офлайн-карти (рисунок 1.4) обчислюються автоматично перед автономною роботою, як правило, використовуючи датчики самого автомобіля. Автомобіль може використовувати більше однієї офлайн-карти, наприклад топографічні, ландшафтні, супутникові тощо [10].

Інформація про правила та положення щодо того, як автомобіль, має рухатися дорогами та автомагістралями (напрямок руху, максимальна швидкість, розмежування смуг тощо) також є необхідною для повноцінної роботи підсистеми прийняття рішень. Ця інформація зазвичай вбудовується в навігаційні карти, які представляють цю інформацію використовуючи геометричні та топологічні властивості карт [10].

Підсистема Картограф (рисунок 1.4) отримує на вхід офлайн-карту та стан безпілотного автомобіля у просторі і генерує на вихід онлайн-карту, яка є злиттям інформації з офлайн-карти, заповненої топографічної карти (дані для якої беруться з датчиків) та стану автомобіля у середовищі.

Також, для системи автопілот дуже важливою є інформація про положення та швидкість руху перешкод. Для цього підсистема відслідковування рухомих об'єктів (Moving Objects Tracker, MOT) (рисунок 1.4) отримує офлайн-карту і стан автомобіля в просторі, обраховує швидкість та положення найближчих перешкод (пішоходів, велосипедистів, тварин, тощо) і корегує онлайн-карту для подальшого безпечного руху автомобіля на дорозі [10].



Рисунок 1.4 - Типова ієрархічна архітектура підсистеми прийняття рішень в системі автопілотування в електромобілях.

Підсистема розпізнавання дорожніх знаків або Traffic Signalization Detector (TSD) відповідає за виявлення та розпізнавання дорожніх сигналів. Він отримує дані датчиків і стан автомобіля, а також визначає положення дорожніх знаків і розпізнає їх клас [10].

З огляду на кінцеву точку, визначену користувачем у режимі офлайн-карти, Планувальник маршруту (рисунок 1.4) обчислює маршрут в офлайн-картах від поточного стану автомобіля до кінцевої точки [10].

Підсистема Планувальник руху (рисунок 1.4) є відповідальною за вибір поточної поведінки руху на дорозі, як наприклад, утримання смуги, управління рухом на перехрестя, управління рухом на світлофорах і тому подібне. Планувальник руху робить це обираючи шлях, наступну позицію і швидкість з якою буде рухатись автомобіль за кілька секунд до поточного стану автомобіля (близько 5 с).

За допомогою точної та синхронної роботи системи автопілот, обчислення стану автомобіля відбувається дуже швидко і у випадку створення непередбачуваної ситуації автомобіль швидко відреагує.

Для того щоб виявити наскільки добре працюють автопілоти різних компаній некомерційна компанія Страховий інститут безпеки дорожнього руху провів тестування деяких моделей з системою автопілот.

В тестах брали участь 2017 BMW 5 Series (Driving Assistant Plus), 2017 Mercedes-Benz E-Class (Drive Pilot), 2018 Tesla Model 3 (Autopilot 8.1), 2016 Tesla Model S (Autopilot 7.1) і 2018 Volvo S90 (Pilot Assist) [11].

Початкове тестування відбувалось з нерухомою машиною на дорозі. Всі учасники тестування, котрі рухались зі швидкістю 50 км/год показали гарні результати і вчасно змогли зупинитись, що означає що система лідарів і розпізнавання нерухомих об'єктів у всіх версіях автопілоту працює відмінно.

Далі були випробування з рухомою машиною на дорозі та при поворотах з різною кривиною, де всі показали гарні результати і змогли підлаштуватись та витримати потрібну дистанцію до машини попереду, а також правильно пройти поворот.

Було відтворено ситуацію при якій автомобіль, який їде попереду машини, що тестується, різко змінював смугу, і на трасі з'являлась перешкода. В рамках цього тесту Tesla Model 3 показала себе дуже добре і їй вдалось уникнути ДТП, в той час коли інші машини вимагали уваги водія для проходження цього випробування.

Було проведено також ряд тестів на дорогах громадського користування під час руху інших учасників дорожнього руху та на автомагістралях. Це дало можливість зрозуміти наскільки системи автопілотування добре виконують свою місію в місті та за ним. Результати тестування щодо того як електромобіль поведив себе на дорогах приведено в таблиці 1.1. Критеріями були наступні параметри: кількість разів коли електромобіль перусікав смугу, торкався смуги, система відключалась чи автомобіль повністю лишався в межах смуги. Тестування проводили як на прямій дорозі без поворотів, так і на горбистій

місцевості з поворотами.

Таблиця 1.1 – Порівняння поведінки системи автопілот у різних автомобілях

Автомобіль	Кількість разів коли під час роботи системи автопілот автомобіль			
	пересікав смугу		торкався смуги	
	при русі по кривій	на пагорбі	при русі по кривій	на пагорбі
BMW 5 Series	3	6	1	1
Mercedes-Benz E-Class	2	1	5	1
Tesla Model 3	0	0	0	1
Tesla Model S	1	12	0	1
Volvo S90	8	2	0	1

Продовження таблиці 1.1

Автомобіль	Кількість разів коли під час роботи системи автопілот автомобіль			
	система відключилась		залишилась в межах смуги	
	при русі по кривій	на пагорбі	при русі по кривій	на пагорбі
BMW 5 Series	9	7	3	0
Mercedes-Benz E-Class	1	1	9	15
Tesla Model 3	0	0	18	17
Tesla Model S	0	0	17	5
Volvo S90	0	4	9	9

Найкраще у випробуваннях показав себе автомобіль Tesla Model 3 (в таблиці виділено та зафарбовано), в той час коли в інших учасників виникали труднощі і вони потребували присутності людини для вирішення складних задач.

Таким чином, на сьогоднішній момент тема розробки систем автопілотування в електромобілях є своєчасною та актуальною. Тому для подальшої роботи над дипломним проектом я обрала електромобіль від компанії Tesla, який на цей момент часу є одним за найпопулярніших та найбезпечніших варіантів електромобілів з системою автопілот.

## 2 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Структурна схема автоматизованої системи керування швидкістю електромобіля представлений на Схемі електричній структурній ІА61.050БАК.005 Э1.

2.1 Опис роботи та аналіз основних елементів структурної схема автоматизованої системи керування швидкістю електромобіля

Система має такі ключові елементи як: блок підсистеми автономного керування електромобілем, блок підсистеми ручного керування, кнопка увімкнення, бортовий комп'ютер, електродвигун, блок акумулятора та блок ходової частини.

Роздивимось роботу кожного елемента окремо:

Блок акумулятора містить основний акумулятор, який живить електродвигун, роз'єм для зарядки, допоміжну акумуляторну батарею, яка слугує для живлення допоміжних систем, та сам зарядний пристрій. Роз'єм зарядки, допоміжна акумуляторна батарея та зарядний пристрій згруповані в блок живлення для зручності. Також наявний контролер живлення який контролює подачу струму на двигун, рівень заряду в акумуляторі та інші.

За допомогою кнопки увімкнення електромобіля подається струм на електродвигун і електромобіль готовий до початку руху.

Найчастіше в електромобілях ставлять синхронні електродвигуни – безколекторні машини, в яких відношення частоти обертання ротора до частоти струму в ланцюгу машини не залежить від навантаження. Статистика показує, що виробники електромобілів ставлять два електродвигуни – по одному на задню та передню осі автомобіля. Як, наприклад, в Porsche Taycan. Він має 2 синхронні двигуни змінного струму на передній та задній осі. Але також використовують асинхронні електродвигуни. Частіше усього трьохфазні, як у

Tesla Model X. [12]

Блок підсистеми автономного керування електромобілем містить в собі блок датчиків, а також систему автопілотування.

Датчики захоплюють зображення навколишнього середовища, в якому знаходиться електромобіль і передають масив даних в підсистему керування напрямом і швидкістю. Після підрахунку траєкторії руху, система дає сигнал на двигун збільшити або зменшити оберти для збільшення чи зменшення швидкості автомобіля.

За необхідності система побудує траєкторію для маневру руху на випередження, якщо не буде ніяких завад. В цьому випадку система дасть сигнал на електродвигун збільшити оберти, для того аби набрати більшу швидкість, та дасть сигнал на систему рульового керування для зміни маршруту.

У випадку непередбачуваної ситуації (наприклад перешкода, яку не помітили датчики, чи велосипедист який їде не по правилах) система почне сигналізувати про необхідність втручання людини у роботу автопілота для вирішення ситуації.

Через те, що автопілот не є автоматизованою системою 5 рівня, представники компаній не рекомендують водіям прибирати руки з руля, для того щоб швидко відреагувати на непередбачувану ситуацію. Так, для індикації того що руки водія знаходяться на рулі використовують датчики які «вшиті» в оболонку руля і у випадку якщо водій прибирає руки довше ніж на 30 с система зробить голосове оповіщення, а у випадку якщо водій прибирає руки більше ніж на 45 с то система ще раз робить сповіщення, шукає безпечне місце в якому можна зупинитись, обережно зупиняється і примусово вимикає електромобіль з автопілотом [13].

Блок підсистеми ручного керування електромобілем містить в собі гальмівну систему та систему рульового керування.

В гальмівній системі електроавтомобілів використовують систему рекуперативного гальмування, що дозволяє під час процесу гальмування

					IA61.050BAK.005 ПЗ	Аркш
						19
Зм.	Аркш	№ док-м.	Підпис	Дата		



додатково заряджати акумулятори електромобіля [14].

Роботу рекуперативної системи гальмування можна описати наступним чином:

- при гальмуванні силовий апарат електромобіля відмикається від акумулятора і переходить в генераторний режим, тим самим самостійно виробляючи енергію;
- в такому режимі на обмотках статора і ротора виникають протилежні токи;
- на валу електромобіля виникає гальмівний момент який і забезпечує гальмування транспортного засобу;
- одночасно з цим кінетична енергія машини перетворюється в тепло та електроенергію;
- після чого електрична енергія поступає в акумулятор, тим самим заряджаючи його.

Як результат – чим частіше електромобіль гальмує тим частіше заряджається акумулятор.



Рисунок 2.1 – Принцип роботи рекуперативної системи в електромобілі.

Використання такої системи не можна назвати достатньо ефективним.

Виробники хоч і називають ККД в 60-70%, але при подальшому перерахунку стає зрозуміло що 20-30% втрачаються одразу ж на перетворення кінетичної енергії в електроенергію.

При використанні такої системи в місті, коли необхідно здійснювати коротке гальмування, користі майже немає, через те що електрокар достатньо легкий і при їзді на рівній поверхні він вивільнює не дуже велику кінетичну енергію. Але варто змінити ландшафт (наприклад, горбиста місцевість, де водію необхідно гальмувати при спуску) і показники рекуперативної системи значно зростуть. Інколи, система може додати ще 20-30% до ходу автомобіля.

Система рульового керування складається з рульового колеса – власне кермо, рульової колонки, яка зв'язує рульове колесо з рульовим механізмом, сам рульовий механізм, який передає заданий вплив на привод, і рульовий привод, який відповідає за зв'язок рульового впливу на колеса.

Більшість сучасних автомобілів мають також гідравлічний підсилювач рульового управління – гідропідсилювач руля, який створює додаткове зусилля при повороті руля. Різновидом гідропідсилювача є електрогідропідсилювач рульового управління. В такому підсилювачі гідропомпа має привод до електродвигуна.

А з розквітом електромобілів все ширше застосовують електричний підсилювач рульового управління – електропідсилювач руля. В такому випадку, крутильний момент від електродвигуна може передаватись напяму на вал руля або зубчасту рейку, а електроніка дозволяє використовувати електропідсилювач для автоматичного керування автомобілем, як в системі автоматичного паркування.

В блоці ходової частини варто приділити увагу одношвидкісній трансмісії. Механічна характеристика електродвигуна, а саме залежність частоти обертання валу, від обертового моменту, який він розвиває, має нелінійну форму. Але, на відміну від двигуна внутрішнього згорання, навіть при повній зупинці ротора електродвигун видає дуже високий момент, майже максимальний. Це розв'язує задачу руху автомобіля з місця і регулювання

оборотів в режимі з постійною швидкістю. Простота електромобіля полягає в тому, що необхідно просто підтримувати максимально високий момент на оборотах згідно з механічною характеристикою двигуна (ця величина визначається завдяки тестам проведених на еталонному двигуні). Дане регулювання відбувається завдяки зміні частоти струму на обмотках. Саме тому в електрокарів трансмісія має спрощений вид. В іншому випадку, звичайна ж трансмісія додала б ваги, тертя і неефективність системі. Ось чому найчастіше в електромобілях ставлять одношвидкісні трансмісії (single-speed). Як приклад, одношвидкісна трансмісія 9.73:1 в Tesla Model S та Tesla Model X (рисунок 2.2).

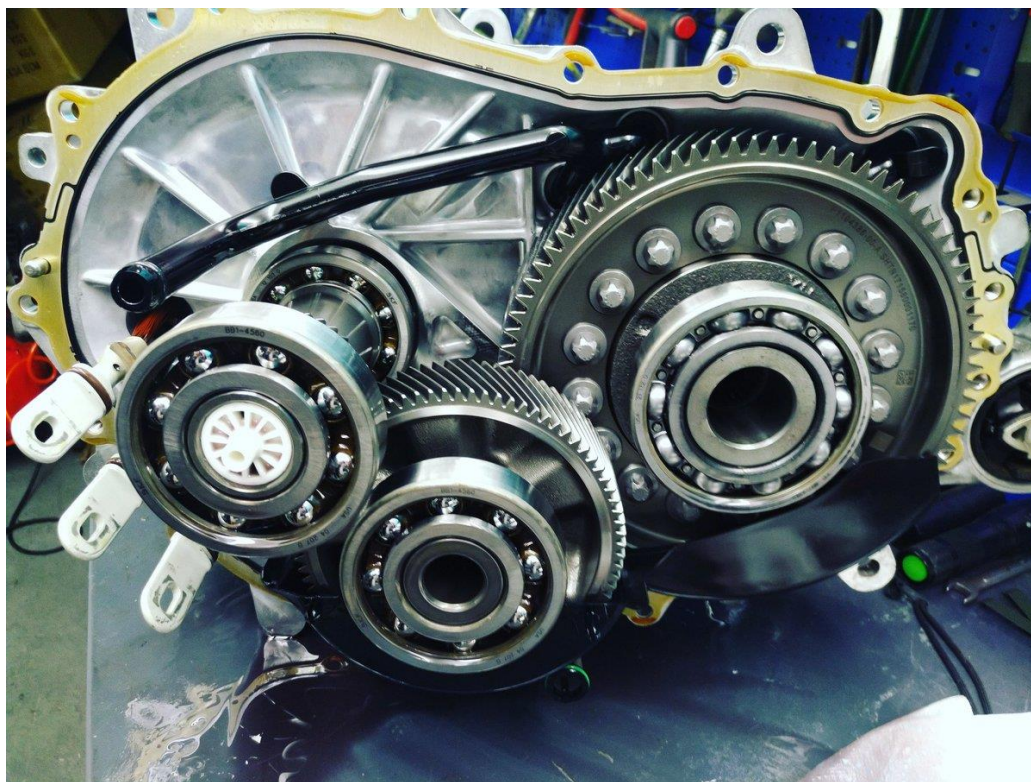


Рисунок 2.2 - Одношвидкісна трансмісія 9.73:1 в Tesla Model S та Model X

Також в електромобілях встановлено бортовий комп'ютер, який слідкує за станом систем та контролює основні функціональні компоненти в електромобілі. Також за допомогою бортового комп'ютера можна здійснювати пошук в інтернеті, прослуховування та перегляд музики та відео, тощо.

Робота електромобіля при ручному керуванні проходить за наступним чином:

- автомобіль вмикається та запускається двигун;
- відбувається внутрішнє тестування основних систем автомобіля на предмет неполадок. При виявленні неполадок виводиться відповідної інформації на панель керування;

- автомобіль готовий до роботи.

Робота електромобіля при автономному керуванні виглядає інакше:

- автомобіль вмикається та запускається двигун;
- відбувається внутрішнє тестування основних систем автомобіля на предмет неполадок. При виявленні неполадок виводиться відповідної інформації на панель керування;

- якщо людина рухається в місцевості де можна увімкнути автопілот автомобіль пропонує це зробити;

- вмикаються всі допоміжні системи (лідари, радары, GPS-датчики, тощо), збираються данні, будується математична модель електромобіля у просторі та будується маршрут до заданої точки (якщо вона є);

- для забезпечення безпечності руху перевіряється наявність рук водія на кермі;

- у випадку непередбачуваної ситуації система робить голосове повідомлення про необхідність втрутитись в роботу системи автопілот.

У всьому іншому робота оператора з електромобілем особливо не відрізняється від роботи з автомобілем на двигуні внутрішнього згоряння.



### 3 РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Функціональна схема електромобіля побудована на базі структурної схеми. Вона представлена на Схемі електричній функціональній ІА61.050БАК.005 Э2.

Блок підсистеми автономного керування автомобілем для зчитування інформації про навколишній світ містить лідари, радары, камери, GPS-датчики, датчики в середині салону та модуль LTE.

Загалом сенсори електромобіля збирають інформацію про навколишні об'єкти, а саме розмір, відстань до автомобіля, швидкість руху, якщо це дорожні знаки – то ідентифікують знак та передають відповідну команду. Також сенсори зчитують інформацію про пішоходів, велосипедистів, інших учасників руху для того аби безпечно пересуватись.

Лідари сканують навколишній світ та створюють модель (карту об'єктів) навколишніх об'єктів, що знаходяться навколо машини. Приклад карти об'єктів побудованої лідаром на автомобілі представлений на рисунку 3.1.

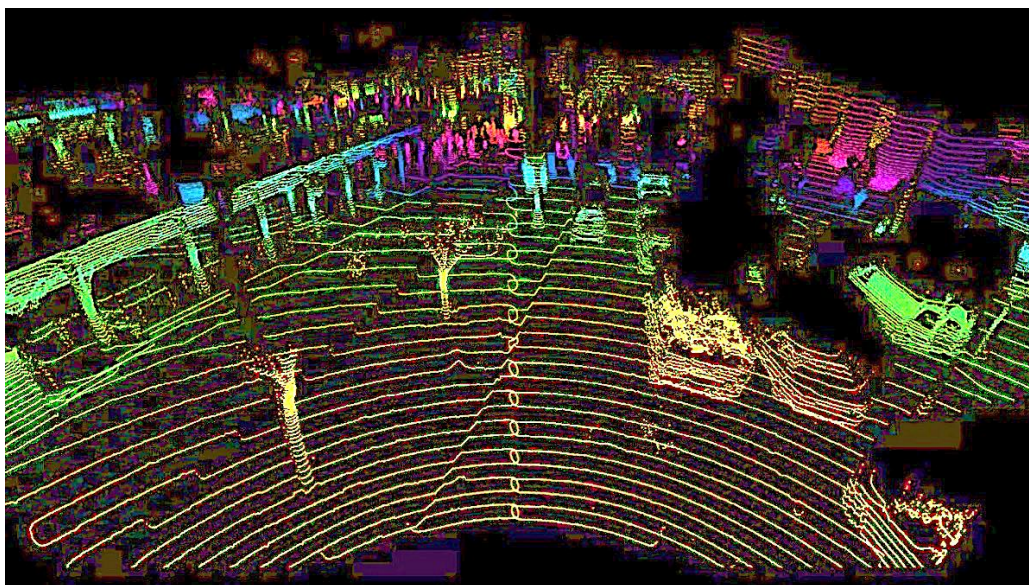


Рисунок 3.1 – Карта об'єктів побудована лідаром.

Радари дозволяють майже миттєво і з високою точністю отримати

інформацію про відстань до об'єкта та його швидкість. Одним з мінусів радара є те, що доводиться обирати між дальністю дії і областю видимості. Можна отримати данні на великій відстані, але при цьому з маленькою областю видимості. Або навпаки, з великою областю видимості, але поблизу.

Набір камер (вузькокутові та ширококутові) знімає навколишнє оточення для того щоб комп'ютерний зір зміг розпізнати дорожню розмітку, знаки, колір світлофора, визначити поведінку об'єктів.

Також в автомобілях використовують ультразвукові сенсори – сонари – для того щоб розпізнати об'єкти, що знаходяться поблизу машини. Принцип дії дуже простий: випромінює ультразвукову хвилю, ловить відбиту хвилю, обчислює відстань до об'єкта.

GPS-датчики використовуються у поєднанні з високоточною картографією для позиціонування автомобіля у просторі. Як було описано вище використовують як онлайн карти так і офлайн, і за допомогою системи Локалізатор можна отримати положення машини на карті.

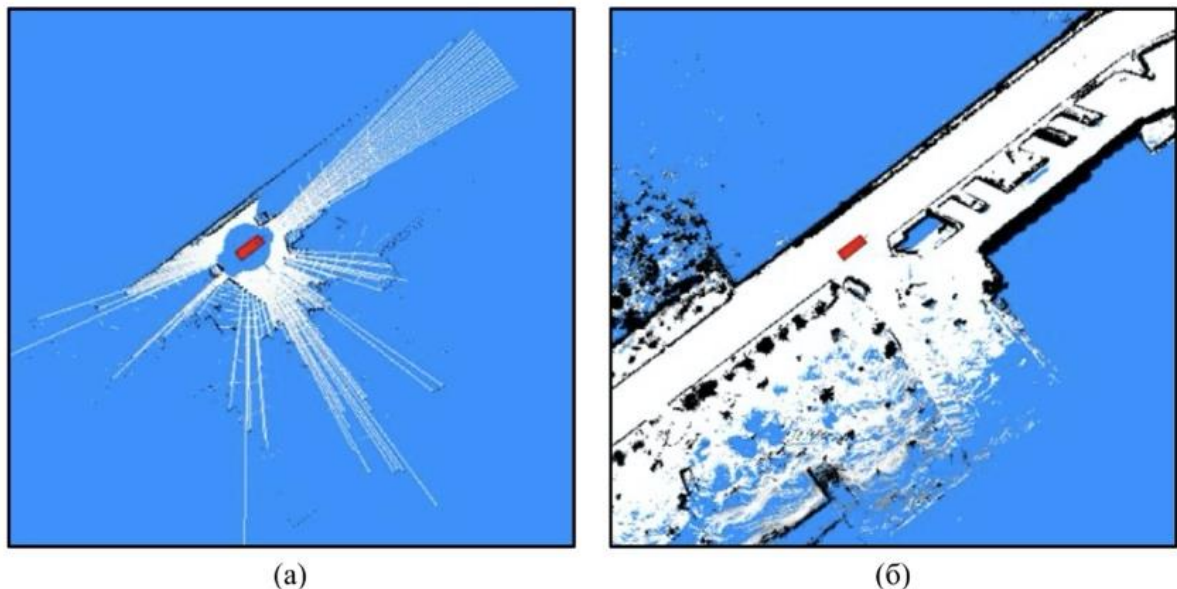
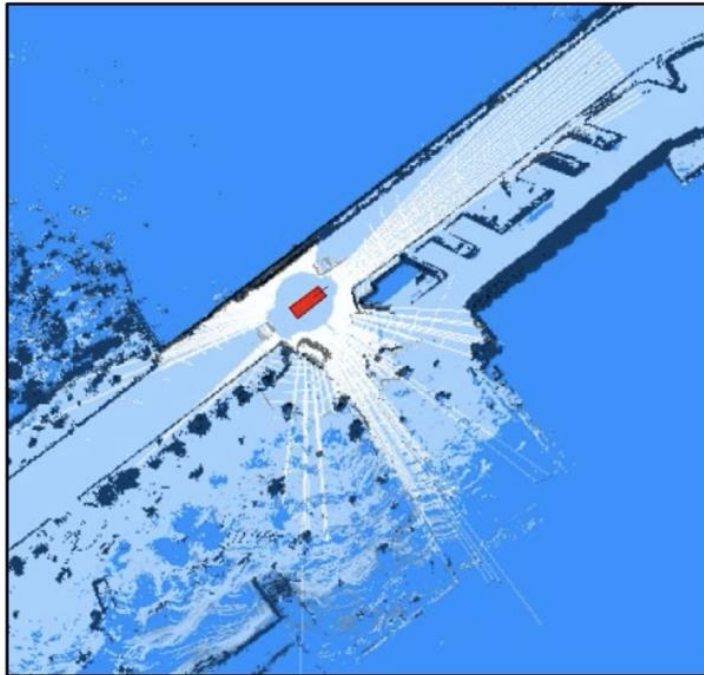


Рисунок 3.2 – Карти, побудовані за допомогою датчиків автомобіля:

а) миттєва карта, після першого сканування місцевості. Червоний прямокутник – це автомобіль на карті, чорні пікселі - місцевість з великим відсотком перешкоди, білі пікселі – місцевість на якій не було знайдено

- перешкод, сірі пікселі – ймовірно містять перешкоди,  
а сині комірки – регіони, до яких «не торкнувся» сенсор;
- б) офлайн карта, на якій показана найактуальніша інформація про  
місцевість в якій знаходиться автомобіль [15];



(в)

Рисунок 3.3 – Карти, побудовані за допомогою датчиків автомобіля:  
в) онлайн карта, яка створюється накладанням миттєвої карти на офлайн  
[15]

Датчики в середині автомобіля - це датчики, які вшиті в кермо. Як було описано вище – система автопілотування буде сигналізувати якщо руки водія не знаходяться на кермі [16].

Для передавання даних про швидкість електромобіля в колеса влаштовано тахометр, який передає всі данні в підсистему керування швидкістю та напрямом. Це зроблено для того аби відслідкувати актуальну швидкість електромобіля та обороти ротора для правильної передачі даних.

Модуль LTE відповідає за стабільну роботу Інтернету для забезпечення оптимальної роботи сервісів, пов'язаних з роботою підсистем локалізації



автомобіля у просторі. Також, модуль LTE використовується для пошуку в інтернеті. Модуль який використовують в електромобілях Tesla зображено на рисунку 3.4.

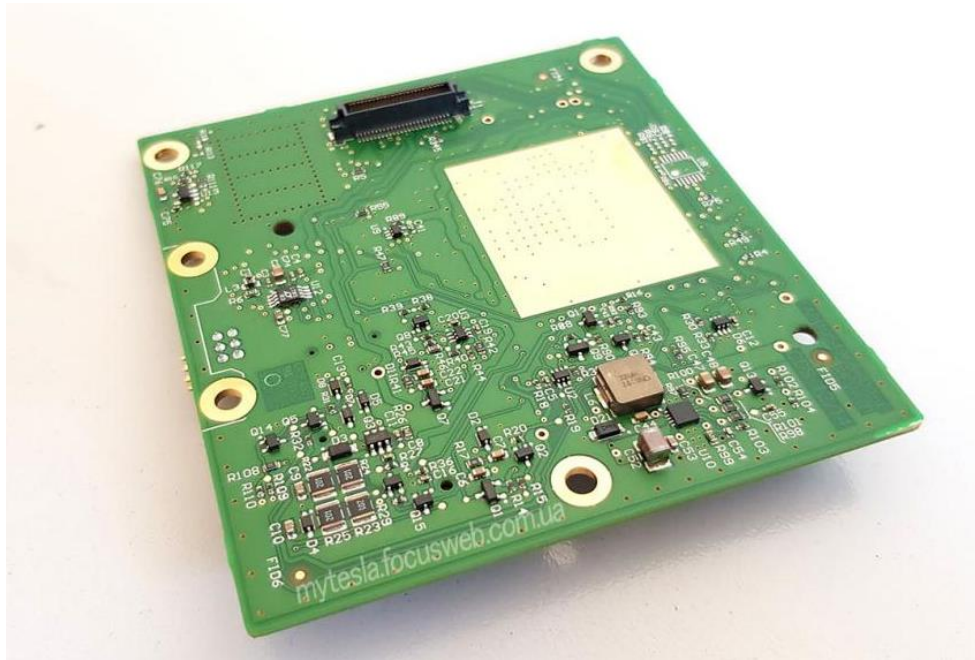


Рисунок 3.4 -Модуль LTE

В блоці акумулятора також міститься холодоелемент. Для того щоб уникнути перегріву акумулятора використовують іммерсійне охолодження за допомогою діелектричної рідини. Така технологія активно використовується при охолодженні обчислювальної техніки. Коли акумулятор починає нагрівати рідину, він активно втрачає температуру, тобто охолоджується. Діелектрична речовина починає закипати під впливом температур і забирає зайву енергію. Це дозволяє забезпечити довший строк роботи акумулятора.



## 4 РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ЦИФРОВОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

### 4.1 Виведення математичної моделі об'єкту управління

Було розглянуто моделі з моделювання ефективності управління автотранспортним засобом по каналу швидкості руху, які відрізняються ступенями мотиваційного сприйняття дорожньої ситуації. З їх числа обрана модель з низьким ступенем мотивації. Це означає, що така модель відповідає ситуації руху на дорозі без перешкод, з гарними погодними умовами (прекрасна видимість, без опадів) та без потреби йти на обгін. Рух контролюється дорожніми знаками, розміткою та світлофорами і відбувається з повним дотриманням правил дорожнього руху. [17]

За основу була прийнята модель системи автоматичного регулювання, що формує керуючі дії оператора щодо вибору швидкості руху [17], схема якої представлена на рисунку 4.1.

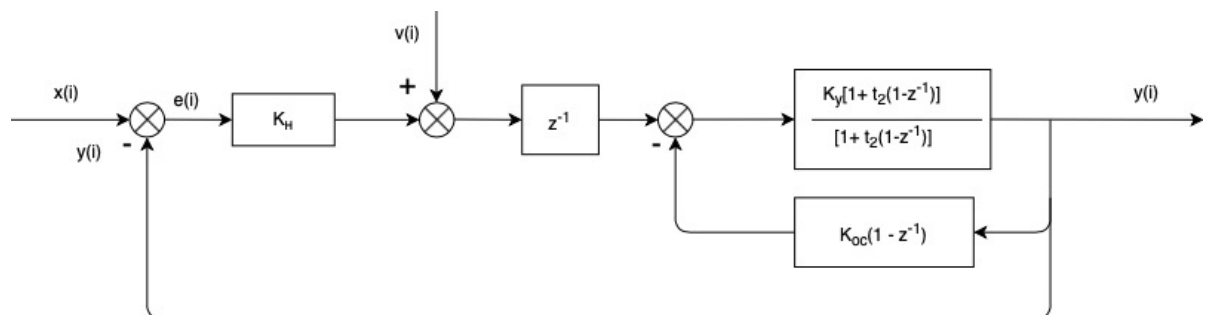


Рисунок 4.1 - Схема математичної моделі автотранспортного засобу з низьким ступенем мотиваційного сприйняття,

де  $K_n$ - коефіцієнт перетворення вимірювача неузгодженостей;

$K_y$ - коефіцієнт перетворення формуючої ланки;

$K_{oc}$  – коефіцієнт перетворення негативного зворотного зв'язку "по швидкості";

$\tau_1, \tau_2$  - постійні часу дискретних аперіодичної і різницевої ланок першого порядку;

$(1 - z^{-1})$  – дискретна різницева ланка;

$1 + \tau_2(1 - z^{-1})$  – різницева ланка 1-го порядку, що характеризує формування динаміки поведінки з урахуванням поведінкової неузгодженості і швидкості її зміни, а також забезпечує стійкість - працездатність поведінкової моделі;

$\frac{1}{1 + \tau_1(1 - z^{-1})}$  - дискретна аперіодична ланка, що враховує інерційність оператора.

#### 4.2 Виведення передавальної функції автоматизованої системи керування швидкістю електромобіля

Передавальна функція автомобіля включає час реакції на спрацювання виконавчих пристроїв автомобіля. У моделі, приведеній на рисунку 4.1, пропонується виконати її інерційною ланкою

$$W_A(s) = \frac{K_d}{T_3 s + 1}, \quad (4.1)$$

В формулі (4.1)  $W_A(s)$  – це передавальна функція автомобіля,  $K_d$  – коефіцієнт підсилення-перетворення,  $T_3$  – постійна часу, що залежить від швидкості руху, типу транспортного засобу, виду приводу, і визначається часом спрацювання виконавчих механізмів автомобіля.

Для розрахунку постійної часу електромобіля було взято паспортні дані електродвигуна електромобіля Tesla Model X.

Таблиця 4.1 – Паспортні данні двигуна електромобіля Tesla Model X [12]

$P_H$	номінальна потужність, (Вт)	193136
$n_H$	номінальна швидкість обертання, (об / хв)	18000
$U_H$	номінальна напругу, (В)	320
$I_H$	номінальний струм якоря, (А)	555.27
$R_d$	опір ланцюга обмотки якоря, (Ом)	0.02
$J_d$	момент інерції якоря, (кг · м <sup>2</sup> )	0.06
$\eta_d$	ККД двигуна	92
$J_{oy}$	момент інерції ОУ	931
$J_p$	момент інерції редуктора, (кг · м <sup>2</sup> )	0.0001
$l_p$	Оптимальне передавальне число редуктора	9.73

Послідовно визначаємо наступні величини, необхідні для розрахунку електромеханічної постійної часу обраного електромобіля.

Номінальна кутова швидкість двигуна  $\omega_H$  визначається за формулою:

$$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30} \quad (4.2)$$

$$\omega_H = \frac{3.14 * 18000}{30} = 1884 \quad (4.3)$$

$M_H$  – номінальний момент двигуна:

$$M_H = 9.55 \frac{P_H}{n_H} \quad (4.4)$$

$$M_H = 9.55 \frac{259000}{18000} = 102.46 \quad (4.5)$$

Коефіцієнт підсилення двигуна  $K_d$  визначається діленням номінальної напруги електродвигуна на номінальну кутову швидкість:

$$K_d = \frac{U_H}{\omega_H} \quad (4.6)$$

$$K_d = \frac{320}{1884} \approx 0.197 = 0.2 \quad (4.7)$$

Формула електромеханічної сталої часу  $T_d$  має вигляд:

$$T_d = \frac{\alpha J_c R_d}{C_m C_c} \quad (4.8)$$

де  $\alpha = 1.2$  – постійний коефіцієнт.

Для полегшення обчислень всі параметри електромеханічної сталої часу було обраховано окремо.

$$C_m = \frac{M_H}{I_H} \quad (4.9)$$

$$C_m = \frac{137.414}{744.63} \approx 0.18454 = 0.185 \quad (4.10)$$

$$C_c = \frac{U_H - 1.2R_d I_H}{\omega_H} \quad (4.11)$$

$$C_c = \frac{320 - 1.2 * 0.02 * 744.63}{1884} \approx 0.16169 = 0.162 \quad (4.12)$$

$J_c$ - сумарний момент інерції

$$J_c = J_d + J_p + \frac{J_0}{l_p^2 \eta_d} \quad (4.13)$$

$$J_c = 0.006 + 0.0001 + \frac{931}{9.73 * 0.92} \approx 10.749 = 10.75 \quad (4.14)$$

Таким чином було отримано електромеханічну сталу часу за формулою (4.8):

$$T_d = \frac{1.2 * 10.75 * 0.02}{0.185 * 0.162} \approx 0.226783 = 0.23 \quad (4.15)$$

Беручи до уваги всі розрахунки, передавальна функція автомобіля в моделі системи автоматичного керування швидкістю електромобіля має вигляд:

$$W_A(s) = \frac{0.2}{0.23s + 1} \quad (4.16)$$

Передавальна функція оператора також є інерційною ланкою. Ця ланка характеризує реакцію та сприйняття оператора дороги та дорожніх умов.

Вираховується за допомогою такої передавальної функції

$$W_n(s) = \frac{1}{T_4 s + 1}, \quad (4.17)$$

де  $W_A(s)$  - передавальна функція інерційної ланки, яка характеризує реакцію оператора на дорогу;

$T_4$  – час реакції оператора на зміну дорожніх умов.

Для вибору оптимального часу спрацьовування автоматизованої системи на зміну дорожніх умов було проаналізовано час сприйняття людиною. Для водія час сприйняття дорожніх умов залежить від часу передачі відчуття від органів чуття в мозок, що в середньому це займає 100-200 мілісекунд (0.1 с – 0.2 с), та від часу реакції мозку на це відчуття (в середньому 0.1 с – 0.3 с)[18]. Тому, можна вважати, що реакція на зміну дорожніх умов  $T_4$  лежить в межах (0.3-0.6) с.

В рамках пакета MathLab Simulink було побудовано модель системи автоматичного регулювання швидкістю електромобіля.

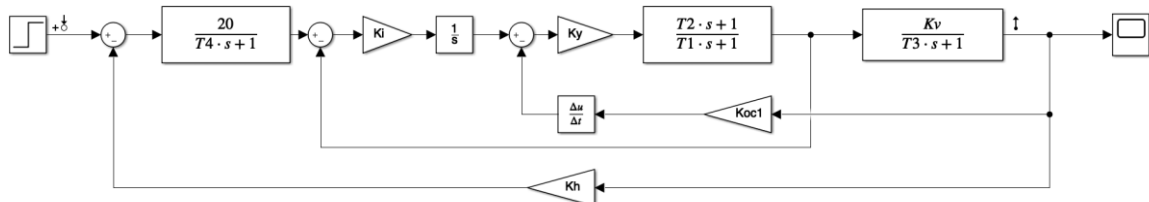


Рисунок 4.2 – Модель системи автоматичного регулювання швидкістю електромобіля.

У моделі (рисунок 4.2) прийняті наступні позначення:  $K_i$  - коефіцієнт перетворення вимірювача неузгодженостей;  $K_y$  - коефіцієнт перетворення формуючої ланки;  $1/s$  - інтегруюча ланка першого порядку;  $T_1, T_2, T_4$  - постійні часу, що характеризують поведінкові функції оператора;  $K_{oc1}$  - коефіцієнт негативного зворотного зв'язку «за швидкістю»;  $K_h$  - коефіцієнт негативного зворотного зв'язку загальної системи регулювання.

Інші параметри  $T_1, T_2, T_3$  були обрані з джерела [19]:  $T_1 = 0.2$ ;  $T_2 = 0.5$ ;  $T_3$

$= 0.6; T_4 = 0.23; K_y = 2; K_i = 1; K_v = 0.2; K_h = 0.8; K_{oc1} = 0.1$ .

Для спрощення моделі передавальної функції використаємо метод лінеаризації системи. На рисунку 4.3 представлені полюси системи.

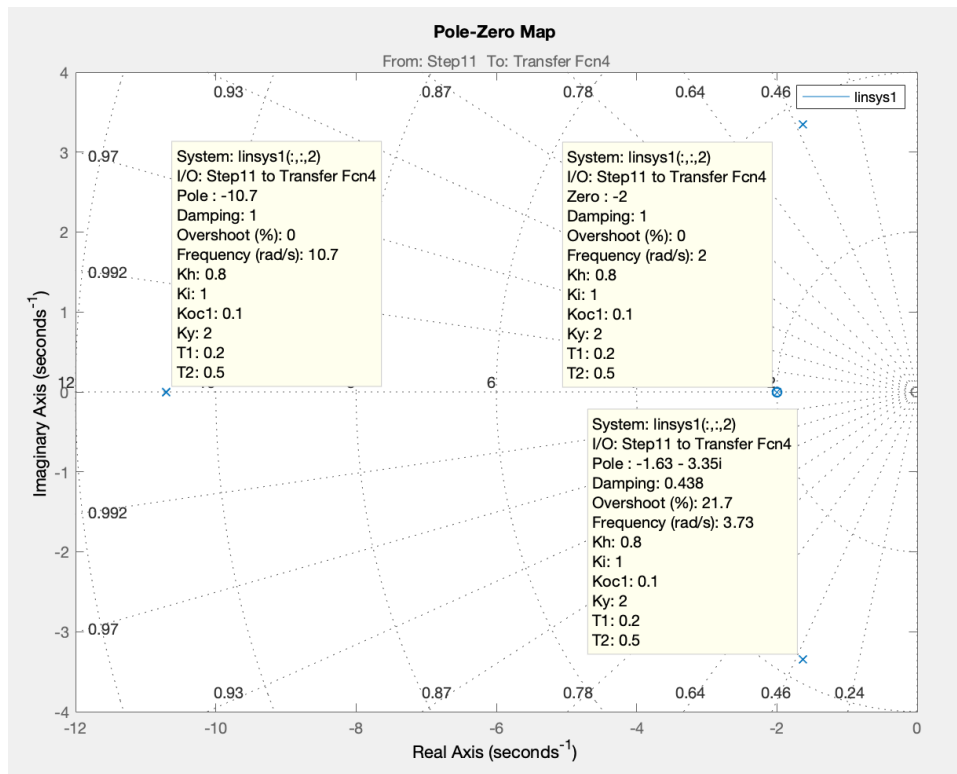


Рисунок 4.3 – Результати аналізу лінеаризованої моделі в пакеті MatLab Linear Anylsis Tool

Як видно з діаграми на рисунку 4.3, передавальна функція лінеаризованої моделі має чотири полюси та нуль. Полюси:  $P_1 = -2$ ,  $P_2 = -10.7$ ,  $P_3 = -1.63 - 3.35i$ ,  $P_4 = -1.63 + 3.35i$ . Нуль:  $O_1 = -2$ .

Передавальна функція лінеаризованої системи безперервної частини має вигляд:

$$\begin{aligned}
 W(s) &= \frac{144.93 * (s + 2)}{(s + 2)(s + 10.71)(s^2 + 3.261s + 13.88)} \\
 &= \frac{144.93}{(s + 10.72)(s^2 + 3.261s + 13.88)} \\
 &= \frac{144.93}{(s + 10.72)(s + 1.63 + 3.35i)(s + 1.63 - 3.35i)}
 \end{aligned}
 \tag{4.18}$$

4.3 Розроблення моделі досліджуваної системи в прикладному пакеті MathLab Simulink.

Будуємо лінеаризовану передавальну функцію в MatLab. Побудована модель зображена на рисунку 4.4.

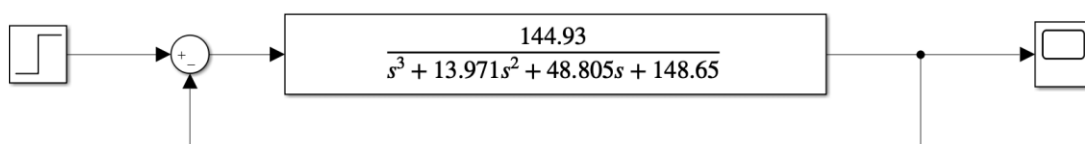


Рисунок 4.4 – Модель лінеаризованої системи.

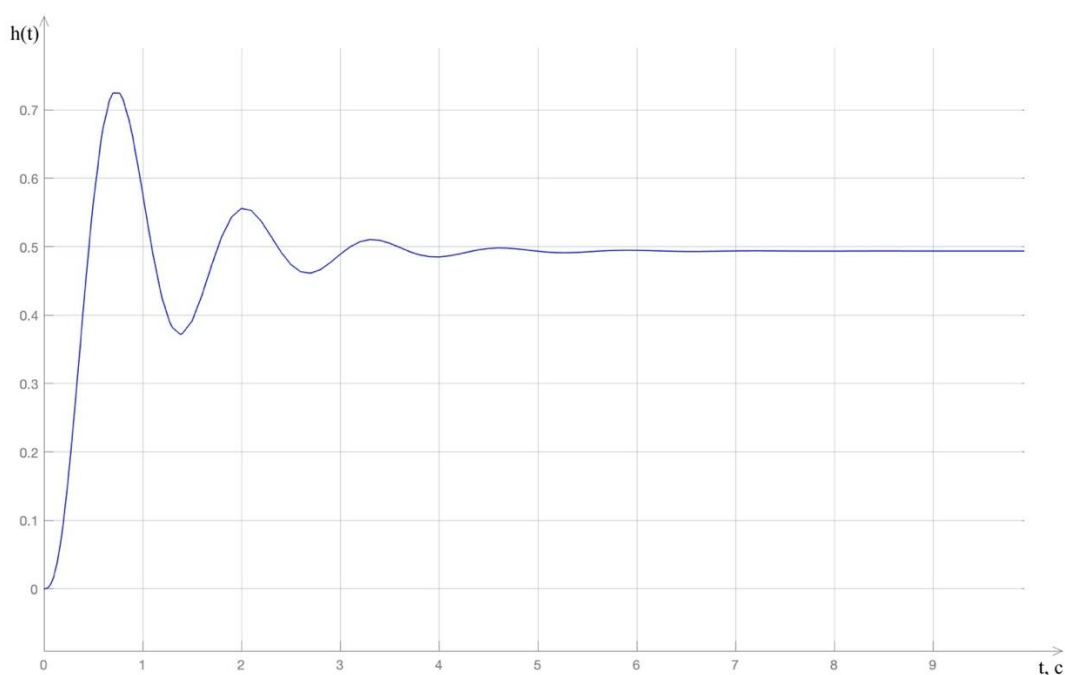


Рисунок 4.5 – Графік перехідного процесу.



Для характеристики перехідного процесу використовуються часові характеристики, а саме перерегулювання, час усталення та час перехідного процесу.

Перерегулюванням  $\sigma\%$ , називається максимальне відхилення вихідної величини від сталого значення. Обчислюється за формулою:

$$\sigma = \frac{h_{\max} - h_{\text{ст}}}{h_{\text{ст}}} * 100\%, \quad (4.19)$$

де  $h_{\max}$  – максимальне відхилення,  $h_{\text{ст}}$  – стале значення.

Час усталення  $t_{\text{уст}}$  - проміжок часу, за який вихідна величина вперше досягла сталого значення.

Час перехідного процесу  $t_{\text{пп}}$  – характеризує швидкодію системи. Це час від початку перехідного процесу до того моменту, коли відхилення вихідної величини залишається в межах заданої величини  $2\sigma$  [20, 21].

Як видно з графіку перехідного процесу на рисунку 4.5 система має такі показники якості:

Максимальне відхилення  $h_{\max} = 0.7403$ ;

Стале значення  $h_{\text{ст}} = 0.4938$ ;

Час усталення  $t_{\text{уст}} = 0.453$  с;

Час перехідного процесу  $t_{\text{пп}} = 3.6$ с;

Перерегулювання  $\sigma = \frac{0.7403 - 0.4938}{0.4938} * 100\% = 49.67\%$

#### 4.4 Розроблення цифрової моделі досліджуваної моделі.

Обчислимо передавальну функцію приведеної безперервної частини системи керування. Передавальна функція обчислюється наступним чином:

$$W_{\text{ПБЧ}}(s) = \frac{1 - e^{-T_0 s}}{s} W_{\text{БЧ}}(s). \quad (4.20)$$

$$W_{\text{ПБЧ}}(s) = Z \left\{ \frac{1 - e^{-T_0 s}}{s} W_{\text{БЧ}}(s) \right\} = Z \left\{ \frac{W_{\text{БЧ}}(s)}{s} \right\} - Z \left\{ \frac{e^{-T_0 s} W_{\text{БЧ}}(s)}{s} \right\} \quad (4.21)$$

Для подальших обчислень треба застосувати теорему про заміщення аргументу в оригіналі.

$$Z \{f(t \pm vT)\} = Z \{e^{\pm vT_0 s} F(s)\} = z^{\pm v} Z \{F(s)\} \quad (4.22)$$

Тоді,

$$Z \left\{ \frac{W_{\text{БЧ}}(s)}{s} \right\} - z^{-1} Z \left\{ \frac{W_{\text{БЧ}}(s)}{s} \right\} = \frac{z - 1}{z} \left\{ \frac{W_{\text{БЧ}}(s)}{s} \right\} \quad (4.23)$$

Розрахунок Z-перетворення аналітично.

$$W_{\text{БЧ}}(z) = \frac{144.93}{(s + 10.72)(s + 1.63 + 3.35i)(s + 1.63 - 3.35i)} \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned} W_{\text{ПБЧ}}(z) &= \frac{z - 1}{z} \left\{ \frac{144.93}{s(s + 10.72)(s + 1.63 + 3.35i)(s + 1.63 - 3.35i)} \right\} \\ &= 144.93 \frac{z - 1}{z} \left\{ \frac{1}{s(s + 10.72)(s + 1.63 + 3.35i)(s + 1.63 - 3.35i)} \right\} \end{aligned} \quad (4.25)$$

Для подальшого обчислення за допомогою методів невизначених коефіцієнтів було розкладено передавальну функцію  $W_{\text{ПБЧ}}$  на суму простих дробів:

$$\frac{A}{s} + \frac{B}{(s + 10.72)} + \frac{C}{(s + 1.63 + 3.35i)} + \frac{D}{(s + 1.63 - 3.35i)} = \frac{1}{s(s + 10.72)(s + 1.63 + 3.35i)(s + 1.63 - 3.35i)} \quad (4.26)$$

$$\begin{aligned} & A(s + 10.72)(s + 1.63 + 3.35i)(s + 1.63 - 3.35i) + \\ & + Bs(s + 1.63 + 3.35i)(s + 1.63 - 3.35i) + \\ & + Cs(s + 10.72)(s + 1.63 - 3.35i) + \\ & + Ds(s + 10.72)(s + 1.63 + 3.35i) = 1 \end{aligned} \quad (4.27)$$

Виконаний математичний розрахунок коефіцієнтів A, B, C і D.

Коефіцієнт B:

$$s = -10.72 \quad (4.28)$$

$$B * (-10.72) * (-10.72^2 + 3.261 * -10.72 + 13.88) = 1 \quad (4.29)$$

$$B * (-1003.085) = 1 \quad (4.30)$$

$$B = -0.00099 \quad (4.31)$$

Коефіцієнт A:

$$s = 0 \quad (4.32)$$

$$A(0 + 10.72)(0^2 + 3.261 * 0 + 13.88) = 1 \quad (4.33)$$

$$A * (148.7936) = 1 \quad (4.34)$$

$$A = 0.00672 \quad (4.35)$$

Коефіцієнт C:

$$s = -1.63 - 3.35i \quad (4.36)$$

$$\begin{aligned} & C(-1.63 - 3.35i)(-1.63 - 3.35i + 10.72)(-1.63 - 3.35i + 1.63 \\ & - 3.35i) = 1 \end{aligned} \quad (4.37)$$

$$C(-1.63 - 3.35i)(9.09 - 3.35i)(-6.7i) = 1 \quad (4.38)$$

$$C(-167.4397 + 174.4626i) = 1 \quad (4.39)$$

$$C = \frac{1}{-167.4397 + 174.4626i} \quad (4.40)$$

Коефіцієнт D:

$$s = -1.63 + 3.35i \quad (4.41)$$

$$D(-1.63 + 3.35i)(-1.63 + 3.35i + 10.72)(-1.63 + 3.35i + 1.63 + 3.35i) = 1 \quad (4.42)$$

$$D(-1.63 + 3.35i)(9.09 + 3.35i)(6.7i) = 1 \quad (4.43)$$

$$D(-167.4397 - 174.4626i) = 1 \quad (4.44)$$

$$D = \frac{1}{-167.4397 - 174.4626i} \quad (4.45)$$

Так як коефіцієнти A, B, C, D відомі, вираз  $W_{\text{ПБЧ}}(z)$  має вигляд:

$$W_{\text{ПБЧ}}(z) = 144.93 \frac{z-1}{z} \left\{ \frac{A}{0.00672} + \frac{B}{-0.00099} + \frac{1}{(s + 1.63 + 3.35i)(-167.4397 + 174.4626i)} + \frac{1}{(s + 1.63 - 3.35i)(-167.4397 - 174.4626i)} \right\} \quad (4.46)$$

Виконати z-перетворення користуючись таблицею z-перетворень неможливо, так як вираз має комплексні числа. У цьому випадку z-перетворення було обраховане завдяки вбудованим методам командного рядка MatLab.

Передавальну функцію безперервної частини в командному рядку:

```
>> wfin=tf([144.93], [1 13.971 48.805 148.65])
```

wfin =

144.9

-----

$$s^3 + 13.97 s^2 + 48.8 s + 148.7$$

Continuous-time transfer function.

Тоді z-перетворення:

>> wzfin = c2d(wfin, 0.1)

wzfin =

$$0.01722 z^2 + 0.04922 z + 0.008586$$

-----

$$z^3 - 1.947 z^2 + 1.272 z - 0.2473$$

Sample time: 0.1 seconds

Discrete-time transfer function.

Моделювання цифрової системи за допомогою блоку Discrete TransferFcn у пакеті MatLab Simulink зображено на рисунку 4.6.

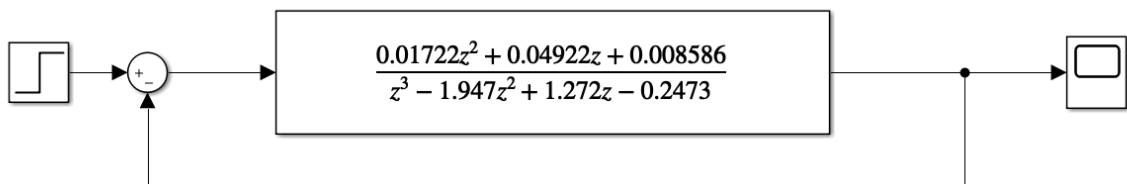


Рисунок 4.6 – Модель цифрової системи

Графік перехідного процесу передавальної функції цифрової системи

представлений на рисунку 4.7.

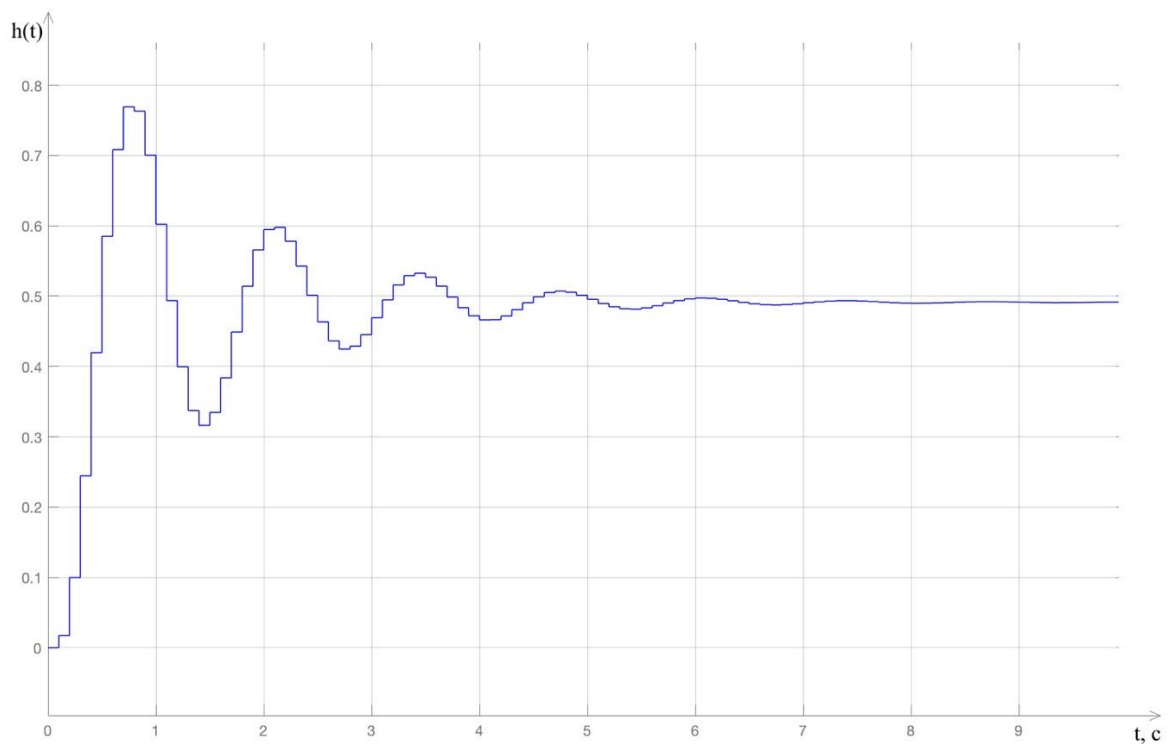


Рисунок 4.7 – Графік перехідного процесу цифрової системи.

Показники якості графіка перехідного процесу цифрової системи, зображеної на рисунку 4.7:

Максимальне відхилення  $h_{\max} = 0.7691$ ;

Стале значення  $h_{\text{ст}} = 0.4915$ ;

Час установлення  $t_{\text{уст}} = 0.6831$  с;

Час перехідного процесу  $t_{\text{пп}} = 3.6$ с;

Перерегулювання  $\sigma = \frac{0.7691 - 0.4915}{0.4915} * 100\% = 65.34\%$

## 5 АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ І ЯКОСТІ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

### 5.1 Аналіз стійкості системи

Дослідження стійкості цифрової системи за допомогою загального алгоритму.

Загальний алгоритм дослідження стійкості полягає у знаходженні коренів характеристичного рівняння [20]. Для цього необхідно замкнути цифрову систему. Замикання цифрової системи відбувається за формулою, наведеною нижче:

$$W_3(z) = \frac{W_{\text{ПВЧ}}(z)}{1 + W_{\text{ПВЧ}}(z)} \quad (5.1)$$

Розрахунок замкненої системи.

$$W_{\text{ПВЧ}}(z) = \frac{0.01722 z^2 + 0.04922z + 0.008586}{z^3 - 1.947z^2 + 1.272z - 0.2473} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} W_3(z) &= \frac{\frac{0.01722 z^2 + 0.04922z + 0.008586}{z^3 - 1.947z^2 + 1.272z - 0.2473}}{1 + \frac{0.01722 z^2 + 0.04922z + 0.008586}{z^3 - 1.947z^2 + 1.272z - 0.2473}} \\ &= \frac{0.01722 z^2 + 0.04922z + 0.008586}{z^3 - 1.947z^2 + 1.272z - 0.2473} \\ &\quad * \frac{z^3 - 1.947z^2 + 1.272z - 0.2473}{z^3 - 1.92978z^2 + 1.32122z - 0.23872} \\ &= \frac{0.01722 z^2 + 0.04922z + 0.008586}{z^3 - 1.92978z^2 + 1.32122z - 0.23872} \end{aligned}$$

Характеристичне рівняння має наступний вигляд:

$$D(z) = z^3 - 1.92978z^2 + 1.32122z - 0.23872 \quad (5.4)$$

Через те, що характеристичне рівняння третього степеня, розклад його на множники виглядає наступним чином:

$$\begin{aligned} D(z) &= z^3 - 1.92978z^2 + 1.32122z - 0.23872 \\ &= (z - 0.276086)(z^2 - 1.65969z + 0.864658) \\ &= (z - 0.276086)(z - 0.826847 + 0.4254i)(z - 0.826847 - 0.4254i) \end{aligned} \quad (5.5)$$

Корені рівняння:

$$z_1 = 0.276086 \quad (5.6)$$

$$z_{2,3} = 0.826847 \pm 0.4254i \quad (5.7)$$

Умовою стійкості системи є

$$|z_i| < 1 \quad (5.8)$$

Модуль комплексних коренів.

$$|z_{2,3}| = \sqrt{u^2 + v^2} = \sqrt{0.826847^2 + 0.4254^2} \approx 0.9219861, \quad (5.9)$$

де  $u$  – дійсна частина;  $v$  – уявна частина.

Оскільки

$$|z_1| = 0.276086 < 1, \quad (5.10)$$



та

$$|z_{2,3}| = 0.922 < 1, \quad (5.11)$$

то система стійка.

Перевіримо систему на стійкість, застосовуючи критерій Гурвіца. Для того щоб застосувати критерій Гурвіца необхідно виконати білінійне перетворення. Для цього в характеристичному рівнянні  $D(z)$  виконується наступна підстановка.

$$z = \frac{1+w}{1-w} \quad (5.12)$$

Заміна в характеристичному рівнянні.

$$\left(\frac{1+w}{1-w}\right)^3 - 1.92978 \left(\frac{1+w}{1-w}\right)^2 + 1.32122 \left(\frac{1+w}{1-w}\right) - 0.23872 = 0 \quad (5.13)$$

Зведення до спільного множника

$$\begin{aligned} \frac{(1+w)^3}{(1-w)^3} - 1.92978 \frac{(1+w)^2(1-w)}{(1-w)^2} \\ + 1.32122 \frac{(1+w)(1-w)^2}{(1-w)} - 0.23872(1-w)^3 = 0 \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$\begin{aligned} \frac{(1+w)^3}{(1-w)^3} - \frac{1.92978(1+w)^2(1-w)}{(1-w)^3} + \frac{1.32122(1+w)(1-w)^2}{(1-w)^3} \\ - \frac{0.23872(1-w)^3}{(1-w)^3} = 0 \end{aligned} \quad (5.15)$$

Розкриття дужок.

$$4.48972w^3 + 2.8924w^2 + 0.46516w + 0.15272 = 0 \quad (5.16)$$

Дане рівняння третього порядку, тому було використано окремий випадок критерію Гурвіца. Для цього рівняння умови стійкості системи мають вигляд:

$$a_0 > 0 \quad (5.17)$$

$$\Delta_1 = a_1 > 0 \quad (5.18)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0 \quad (5.19)$$

Третій (останній визначник) дає умова .

Обчислення умов.

$$a_0 = 4.48972 > 0 \quad (5.20)$$

$$\Delta_1 = a_1 = 2.8924 > 0 \quad (5.21)$$

$$\begin{aligned} \Delta_2 &= 2.8924 * 0.46516 - 4.48972 * 0.15272 = 1.3454 - 0.6856 \\ &= 0.6597 \end{aligned} \quad (5.22)$$

$$\Delta_2 = 0.6597 > 0 \quad (5.23)$$

$$a_3 = 0.15272 > 0 \quad (5.24)$$

Оскільки всі умови виконуються то система стійка.

Стійкість системи визначається також за допомогою критерія Найквіста.

За допомогою командного рядка MatLab було побудовано АФЧХ ЦС.

>> nyquist(wzfin)

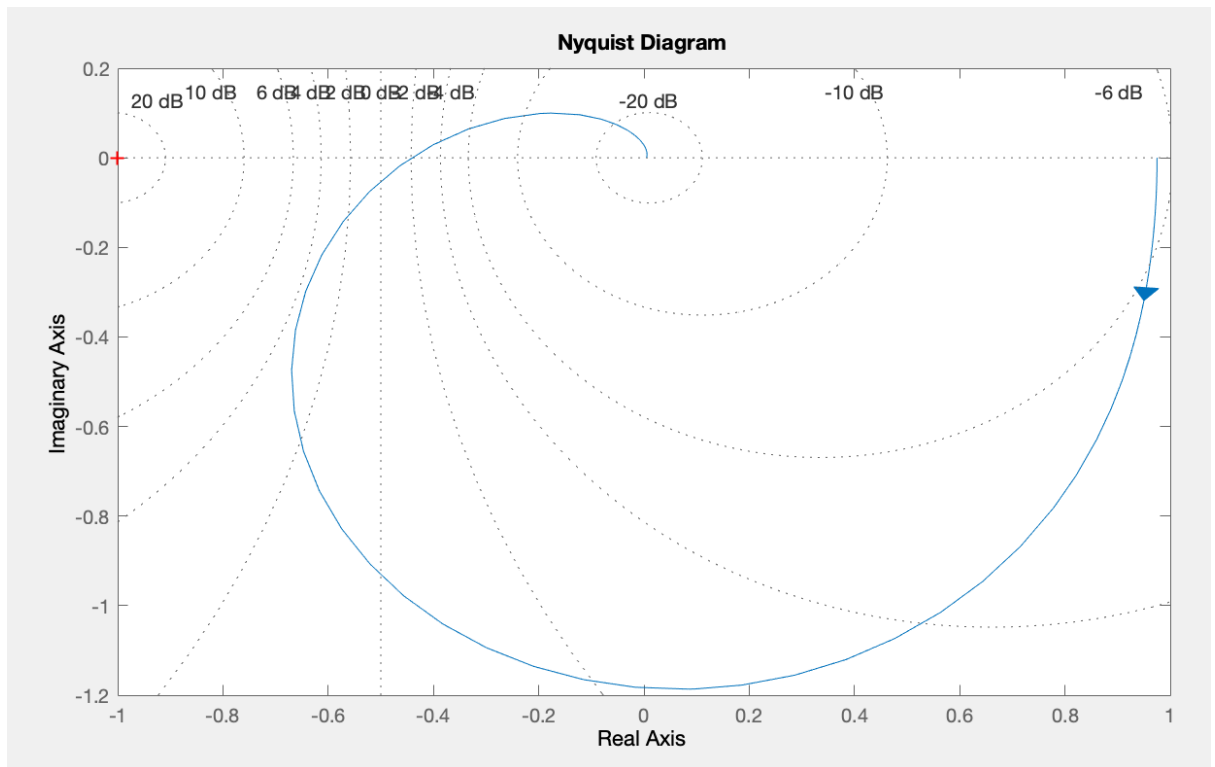


Рисунок 5.1 – АФЧХ

Як видно з графіка, кількість полюсів  $l$ , що лежать поза колом одиничного радіуса  $l = 0$  ( $z_1 = -0.342011$ ;  $z_{1,2} = -0.824 \pm 0.2812i$ ). То можна зробити висновок що система є стійкою, оскільки АФЧХ розімкнутої системи охоплює точку  $(-1; j_0) \frac{0}{2} = 0$  разів, інакше кажучи не охоплює вказану точку.

## 5.2 Аналіз якості системи

Стала похибка системи визначається за теоремою про кінцеве значення  $z$ -перетворення.

$$\varepsilon_{\text{ст}} = \lim_{z \rightarrow 1} (z - 1)E(z) \quad (5.25)$$

$Z$ -перетворення одиничного стрибка визначається за такими формулами:

$$\xi(t) = 1(t) \quad (5.26)$$

$$\Xi(z) = Z\{1(t)\} = \frac{z}{z-1} \quad (5.27)$$

Визначена похибка:

$$\begin{aligned} E(z) &= \Xi(z)(1 - W_3(z)) \\ &= \frac{z}{z-1} \left( 1 - \frac{0.01722 z^2 + 0.04922z + 0.008586}{z^3 - 1.92978z^2 + 1.32122z - 0.23872} \right) \\ &= \frac{z}{z-1} \left( \frac{z^3 - 1.9315z^2 + 1.272z - 0.247305}{z^3 - 1.92978z^2 + 1.32122z - 0.23872} \right) \\ &= \frac{z^4 - 1.9315z^3 + 1.272z^2 - 0.247305z}{(z^3 - 1.92978z^2 + 1.32122z - 0.23872)(z-1)} \end{aligned} \quad (5.28)$$

Отож, стала похибка:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{ст}} &= \lim_{z \rightarrow 1} (z-1)E(z) \\ &= \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) \frac{z^4 - 1.9315z^3 + 1.272z^2 - 0.247305z}{(z^3 - 1.92978z^2 + 1.32122z - 0.23872)(z-1)} \\ &= \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z^4 - 1.9315z^3 + 1.272z^2 - 0.247305z}{z^3 - 1.92978z^2 + 1.32122z - 0.23872} \\ &= \frac{1 - 1.9315 + 1.272 - 0.247305}{1 - 1.92978 + 1.32122 - 0.23872} \approx 0.51023 \end{aligned} \quad (5.29)$$

Для перевірки правильності розрахунків побудуємо систему в Simulink.

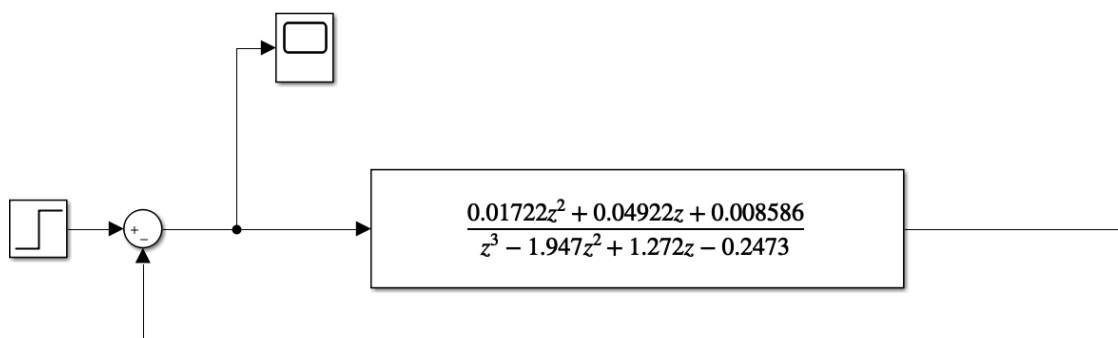
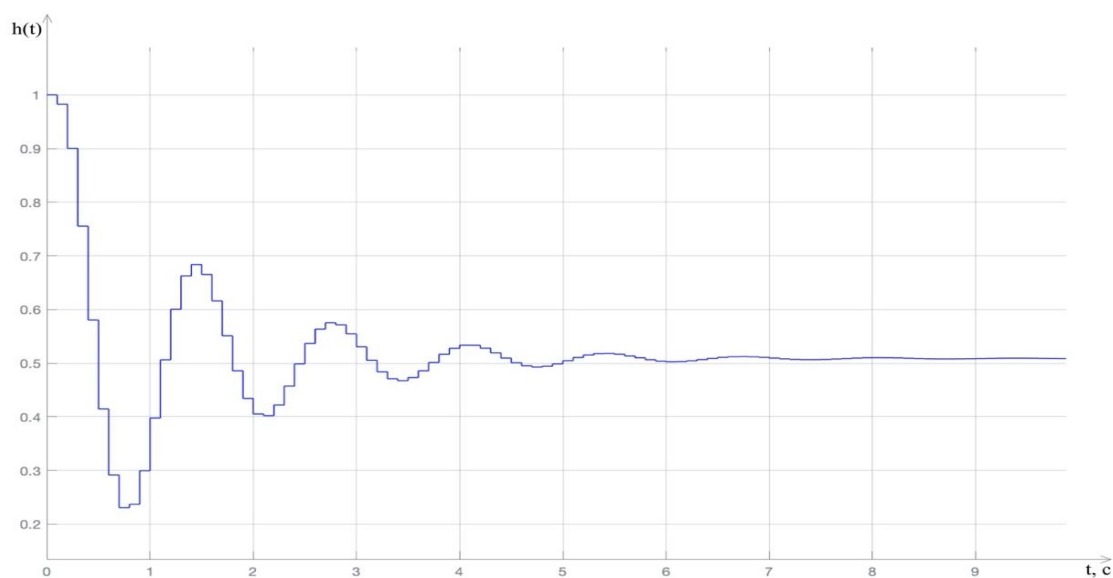
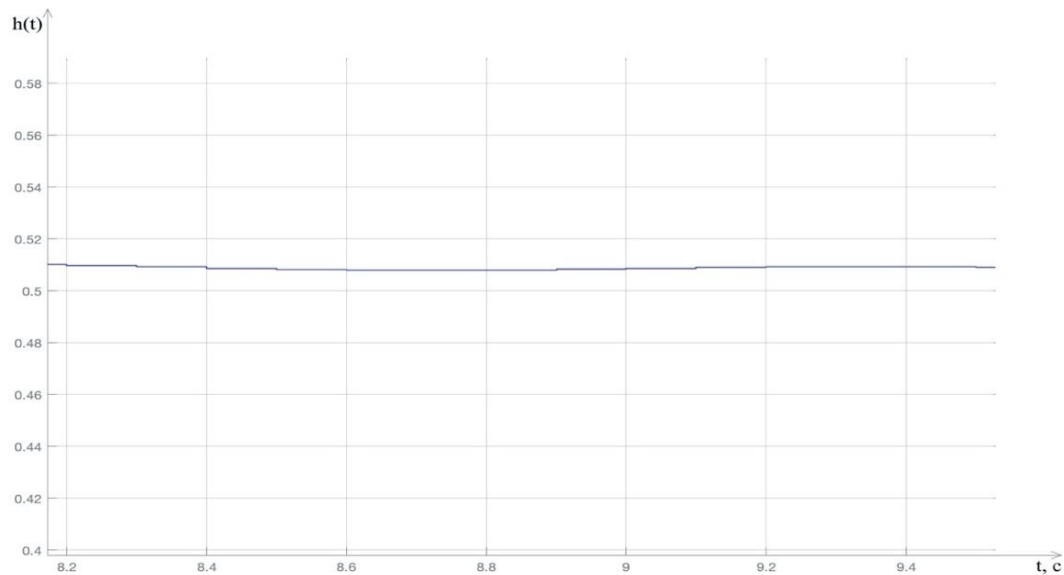


Рисунок 5.2 – Модель системи для визначення сталої похибки.

Графік сталої похибки на одиничний сигнал представлено на рисунку 5.3.



а)



б)

Рисунок 5.3 – Похибка цифрової системи при одиничному стрибку:

а) – графік похибки;

б) – збільшена ділянка графіка, що відповідає сталому значенню.

Таким чином, хоча досліджувана система є стійкою, показники якості не задовольняють вимогам дипломного проєкту тому необхідно виконати синтез цифрового регулятора.

## 6 СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА

В даному розділі розглядаються 2 методи синтезу цифрового регулятора – метод вибору бажаних передавальних функцій і пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор [20, 21].

### 6.1 Синтез цифрового регулятора методом вибору бажаних передавальних функцій

Розрахунок цифрової системи, заснованої на виборі бажаної передавальної функції. Бажана передавальна функція має вигляд:

$$\Phi(z) = \frac{W_p(z)}{1 + W_p(z)} = \frac{D(z)W_{\text{ПБЧ}}(z)}{1 + D(z)W_{\text{ПБЧ}}(z)}, \quad (6.1)$$

де  $\Phi(z)$  – передавальна функція замкнутої системи;

$W_p(z)$  – передавальна функція розімкнутої системи;

$W_{\text{ПБЧ}}(z)$  - передавальна функція приведеної безперервної частини;

$W_p(z)$  - передавальна функція цифрового регулятора;

$$\Phi(z) + \Phi(z) * D(z) * W_{\text{ПБЧ}}(z) = D(z) * W_{\text{ПБЧ}}(z), \quad (6.2)$$

$$\Phi(z) = D(z)[W_{\text{ПБЧ}}(z) - \Phi(z) * W_{\text{ПБЧ}}(z)] \quad (6.3)$$

$$D(z) = \frac{\Phi(z)}{W_{\text{ПБЧ}}(z)[1 - \Phi(z)]} = \left[ \begin{array}{l} \Phi(z) + \Phi(z) * W_p(z) = W_p(z) \\ W_p(z) = \frac{\Phi(z)}{1 - \Phi(z)} \end{array} \right] \quad (6.4)$$
$$= \frac{W_p(z)}{W_{\text{ПБЧ}}(z)}$$

Необхідно, щоб синтезована система мала астатизм першого порядку. Для цього необхідно щоб передавальна функція мала наступний вигляд:

$$\Phi(z) = \frac{B(z)M_1(z)}{Q(z)}; \quad 1 - \Phi(z) = \frac{(z-1)^r * C^-(z) * N_1(z)}{Q(z)} \quad (6.5)$$

Для цього записуємо передавальну функцію у наступному вигляді:

$$W(z) = \frac{0.01722 z^2 + 0.04922z + 0.008586}{z^3 - 1.947z^2 + 1.272z - 0.2473}, \quad (6.6)$$

$$r_0 = 0; r = 1$$

Виконано факторизацію:

$$C^+(z) = z^3 - 1.947z^2 + 1.272z - 0.2473; \quad (6.7)$$

$$B(z) = 0.01722 z^2 + 0.04922z + 0.008586; \quad (6.8)$$

Обраний поліном  $Q(z)$ ;

$$Q(z) = (z - 0.5)^3 = z^3 - 1.5z^2 + 0.75z - 0.25 \quad (6.9)$$

Визначено  $M_1, N_1$  за формулою:

$$B(z) * M_1(z) + (z-1)^r * C_1^-(z) * N_1(z) = Q(z) \quad (6.10)$$

При цьому  $\|N_1\| \geq \|B\|$ ,  $\|M_1\| \geq \|C_1^-\| + r-1$ . Для нашої передавальної функції маємо розрахунки:

$$\|N_1\| \geq \|B\| \quad (6.11)$$

$$\|N_1\| \geq 1 \quad (6.12)$$

$$N_1(z) = n_2(z) + n_1(z) + n_0(z) \quad (6.13)$$



$$||M_1|| \geq ||C_1^-|| + r - 1 \quad (6.14)$$

$$||M_1|| = 0 + 1 - 1 = 0 \quad (6.15)$$

$$||M_1|| = m_0 \quad (6.16)$$

$$B(z) * M_1(z) + (z + 1)^r * C_1(z) * N_1(z) = Q(z) \quad (6.17)$$

$$(0.01722 z^2 + 0.04922z + 0.008586) * m_0 + (z - 1) * (n_2 * z^2 + n_1 * z + n_0) = z^3 - 1.5x^2 + 0.75z - 0.25 \quad (6.18)$$

$$\begin{aligned} z^3 \quad n_2 &= 1 \\ z^2 \quad 0.01722 * m_0 + n_1 - n_2 &= -1.5 \\ z^1 \quad 0.04922 * m_0 + n_0 - n_1 &= 0.75 \\ z^0 \quad 0.008586 * m_0 - n_0 &= -0.125 \end{aligned} \quad (6.19)$$

$$n_2 = 1 \quad (6.20)$$

$$n_1 = -0.5 - 0.01722 * m_0 \quad (6.21)$$

$$n_0 = 0.25 - 0.06644 * m_0 \quad (6.22)$$

$$m_0 = 1.666 \quad (6.23)$$

$$n_2 = 1 \quad (6.24)$$

$$n_1 = -0.5024 \quad (6.25)$$

$$n_0 = 0.1394 \quad (6.26)$$

$$m_0 = 1.666 \quad (6.27)$$

Формула з обчисленими параметрами має вигляд:

$$\begin{aligned} D(z) &= \frac{(z - 1)^{r_0-1} * C_1^+(z) * M_1(z)}{N_1(z)} \\ &= \frac{(z - 1)^{-1} * (z^3 - 1.947z^2 + 1.272z - 0.2473) * 1.666}{z^2 - 0.5024z + 0.1394} \\ &= \frac{1.666z^3 - 3.2437z^2 + 2.1191z - 0.412}{z^3 - 1.5024z^2 + 0.6418z - 0.1394} \end{aligned} \quad (6.28)$$

Регулятор, за методом вибору бажаних передавальних функцій в MatLab Simulink зображений на рисунку 6.1.

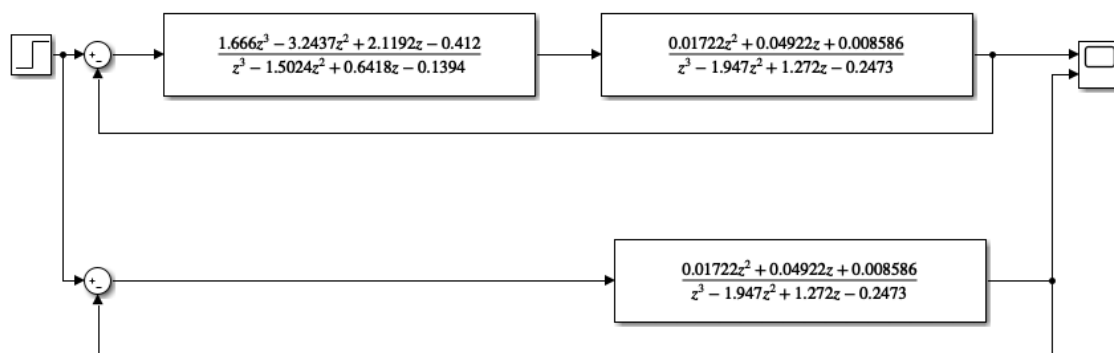


Рисунок 6.1 – Модель системи з цифровим регулятором та без.

Графік перехідного процесу зображений на рисунку 6.2.

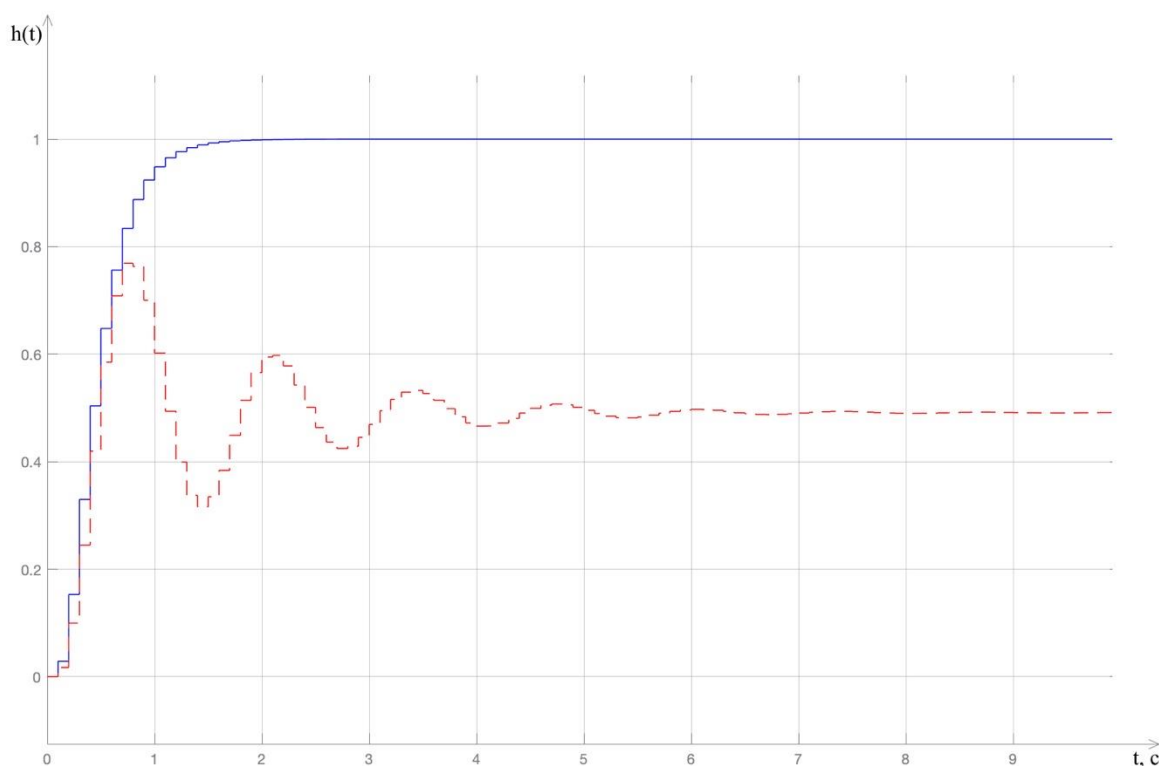


Рисунок 6.2 – Графік перехідного процесу з регулятором (суцільна лінія) та без нього (пунктирна лінія).

Як видно з графіків на рисунку 6.2, параметри перехідного процесу значно покращились.

Показники якості:

– Без регулятора:

Максимальне відхилення  $h_{\max} = 0.7691$ ;

Стале значення  $h_{\text{ст}} = 0.4915$ ;

Час установлення  $t_{\text{уст}} = 0.6831$  с;

Час перехідного процесу  $t_{\text{пп}} = 3.6$  с;

Перерегулювання  $\sigma = \frac{0.7691 - 0.4915}{0.4915} * 100\% = 65.34\%$

– З регулятором:

Максимальне відхилення  $h_{\max} = 1$ ;

Стале значення  $h_{\text{ст}} = 1$ ;

Час установлення  $t_{\text{уст}} = 0.895$  с;

Час перехідного процесу  $t_{\text{пп}} = 1.1$  с;

Перерегулювання  $\sigma = \frac{1-1}{1} * 100\% = 0\%$ ;

## 6.2 Синтез цифрового ПІД-регулятора

Було виконано розрахунок пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулятора. Структурна схема ПІД регулятора зображена на рисунку 6.3.

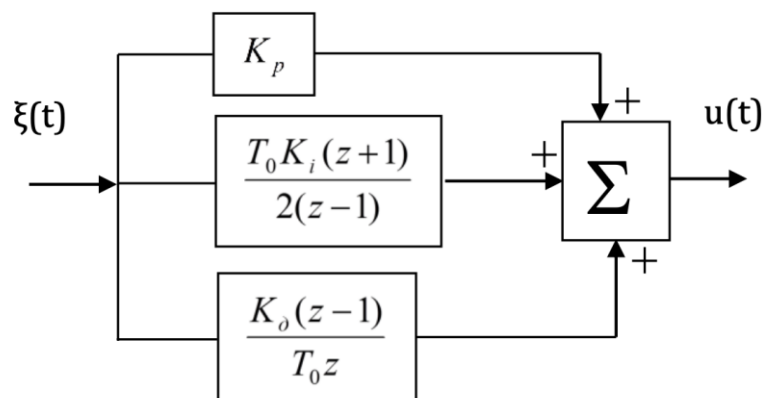


Рисунок 6.3 – структурна схема ПІД-регулятора.

Передавальна функція розімкнутої системи з цифровим ПД регулятором буде мати вигляд:

$$W_{СК}(z) = W_{ПД}(z) * W_{ПБЧ}(z)$$

$$= \frac{(K_i T_0^2 + 2K_d + 2K_p T_0)z^2 + (K_i T_0^2 - 2K_p T_0 - 4K_d)z + 2K_d}{2T_0(z(z - 1))} \quad (6.29)$$

$$* W_{ПБЧ}(z)$$

В формулі 6.29  $T_0$  – це період квантування,  $K_i$ ,  $K_d$  і  $K_p$  – параметри інтегральної диференціальної і пропорційний складових закону регулювання.

Для того щоб синтезувати ПД-регулятор необхідно розрахувати параметри  $K_i$ ,  $K_d$  і  $K_p$ . Для цього було використано вбудовані методи обрахунку в командному рядку MatLab.

>> pidtool(wzfin)

MatLab автоматично порахував усі параметри для ПД-регулятора.

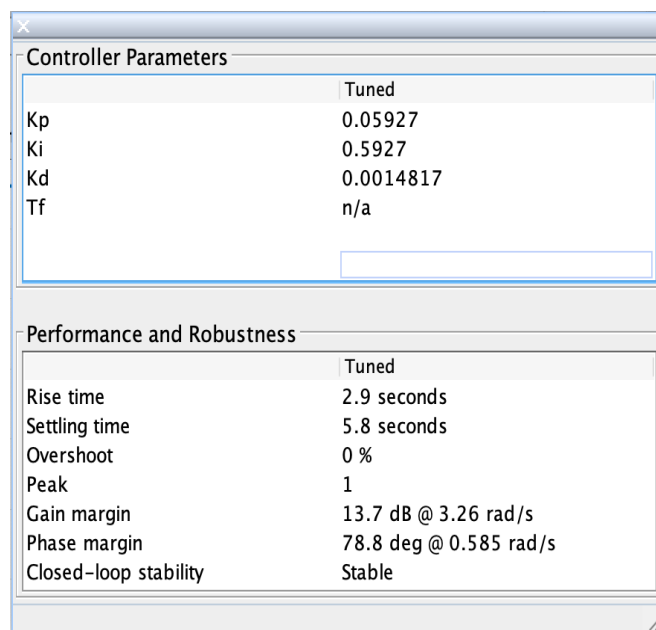


Рисунок 6.4 – Пораховані параметри  $K_i$ ,  $K_d$  і  $K_p$ .

Побудована схема з цифровим ПІД-регулятором в MatLab Simulink представлено на рисунку 6.5.

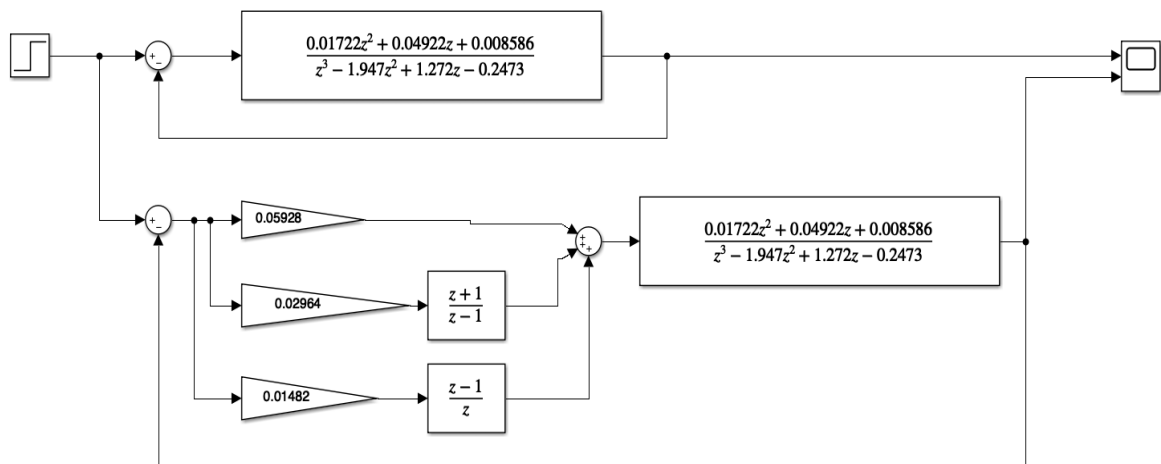


Рисунок 6.5 – Модель цифрової системи з ПІД-регулятором та без нього.

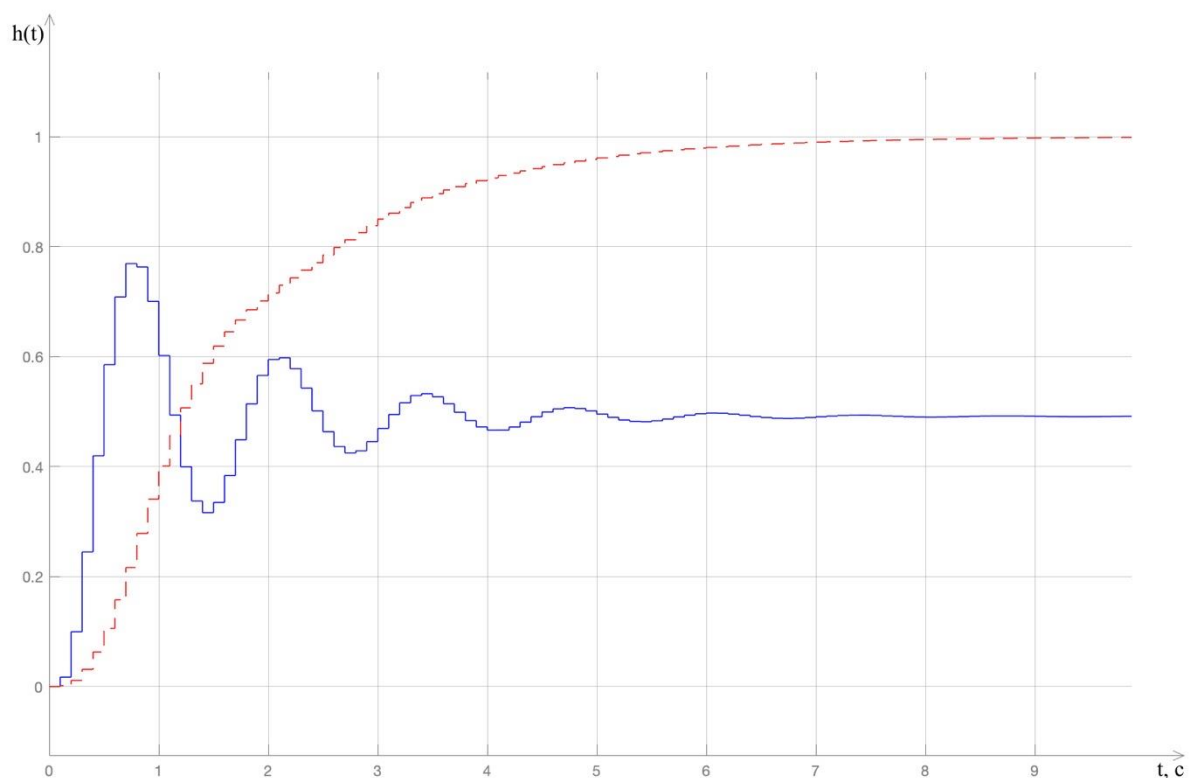


Рисунок 6.6 – Графіки перехідного процесу з цифровим ПІД-регулятором (пунктиром) і без нього (суцільна лінія).

Показники якості:

– Без регулятора:

Максимальне відхилення  $h_{\max} = 0.7691$ ;

Стале значення  $h_{\text{ст}} = 0.4915$ ;

Час установлення  $t_{\text{уст}} = 0.6831$  с;

Час перехідного процесу  $t_{\text{пп}} = 2.8$ с;

Перерегулювання  $\sigma = \frac{0.7691-0.4915}{0.4915} * 100\% = 65.34\%$ ;

– З регулятором:

Максимальне відхилення  $h_{\max} = 1$ ;

Стале значення  $h_{\text{ст}} = 1$ ;

Час установлення  $t_{\text{уст}} = 10$  с;

Час перехідного процесу  $t_{\text{пп}} = 10$  с;

Перерегулювання  $\sigma = \frac{1-1}{1} * 100\% = 0\%$ ;

З огляду з графіків перехідного процесу на рисунку 6.2 та рисунку 6.6, які було отримано при моделюванні регулятора за бажаними функціями та ПІД регулятора можна зробити висновок, що для подальших розрахунків краще брати регулятор, заснований на виборі бажаних функцій, адже завдяки йому значно покращились параметри перехідного процесу, а саме час перехідного процесу став набагато меншим (2.1 с) і зникло перерегулювання.

## 7 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА

### 7.1 Метод безпосередньої декомпозиції

У загальному вигляді передавальна функція цифрового регулятора має вигляд

$$D(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}}{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}} = \frac{E_2(z)}{E_1(z)} \quad (7.1)$$

Для методу безпосередньої декомпозиції функція цифрового регулятора представляється наступним чином [20, 21].

$$E_2(z) = (b_0 + b_0 z^{-1} + b_0 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}) * A(z), \quad (7.2)$$

де  $A(z)$ - фіктивна змінна.

$$A(z) = \frac{1}{a_0} E_1(z) - \frac{1}{a_0} (a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}) * A(z). \quad (7.3)$$

Тоді, на основі цієї формули модель методу безпосередньої декомпозиції матиме вигляд, як на рисунку 7.1.

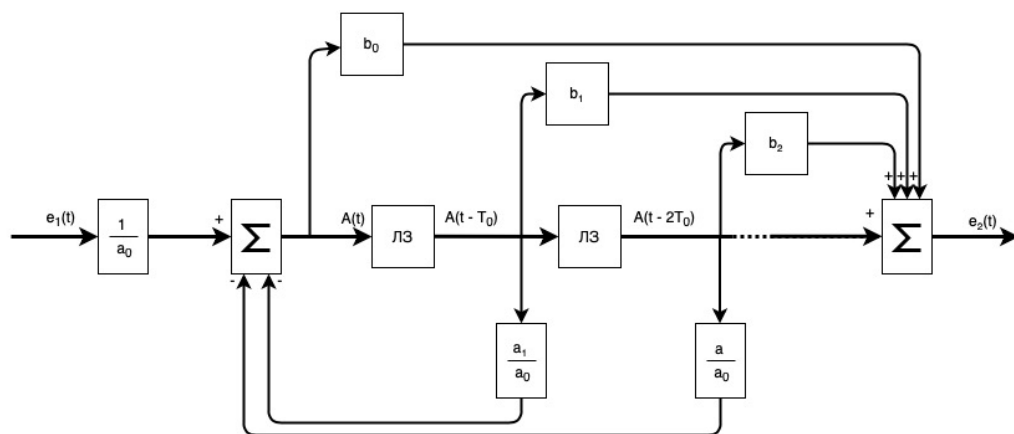


Рисунок 7.1 – Структурна схема моделі методу безпосередньої декомпозиції [19, 20]

У попередньому розділі (6.1) було розроблено модель цифрового регулятора у вигляді такої передавальної функції:

$$D(z) = \frac{1.666z^3 - 3.2437z^2 + 2.1191z - 0.412}{z^3 - 1.5024z^2 + 0.6418z - 0.1394} \quad (7.4)$$

Представимо цю функцію в типовому вигляді для використання методу безпосередньої декомпозиції:

$$D(z) = \frac{1.666 - 3.2437z^{-1} + 2.1191z^{-2} - 0.412z^{-3}}{1 - 1.5024z^{-1} + 0.6418z^{-2} - 0.1394z^{-3}} = \frac{E_2(z)}{E_1(z)} \quad (7.5)$$

$$E_2(z) = (1.666z^3 - 3.2437z^2 + 2.1191z - 0.412) * A(z) \quad (7.6)$$

$$\begin{aligned} A(z) &= \frac{1}{1} E_1(z) - \frac{1}{1} (-1.5024z^{-1} + 0.6418z^{-2} - 0.1394z^{-3}) * A(z) \\ &= E_1(z) + 1.5024z^{-1} * A(z) - 0.6418z^{-2} * A(z) \\ &\quad + 0.1394z^{-3} * A(z) \end{aligned} \quad (7.7)$$

Схема з реалізацією цифрового регулятора методом безпосередньої декомпозиції на моделі MATLAB/Simulink:

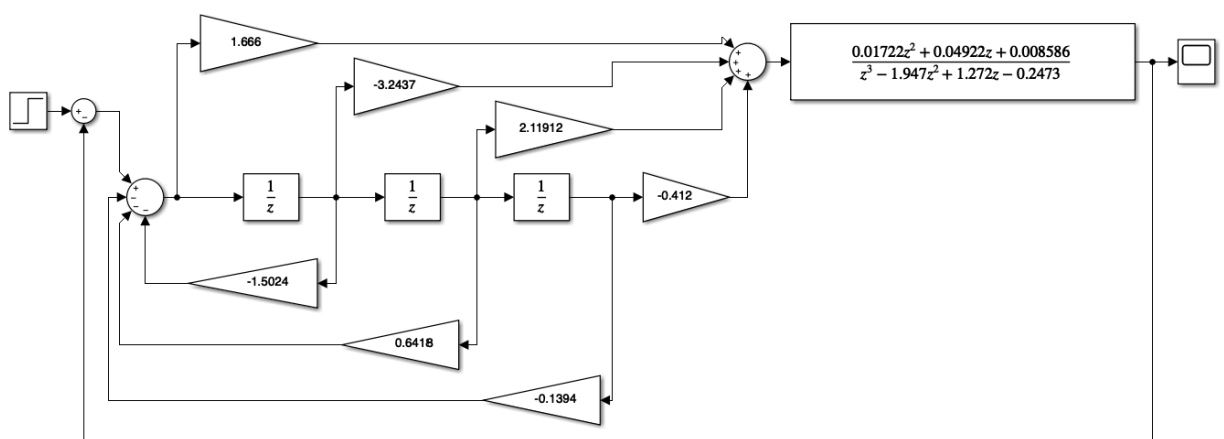


Рисунок 7.2 – Модель цифрової системи з цифровим регулятором, який реалізовано методом безпосередньої декомпозиції

Результат моделювання можна побачити на рисунку 7.3.



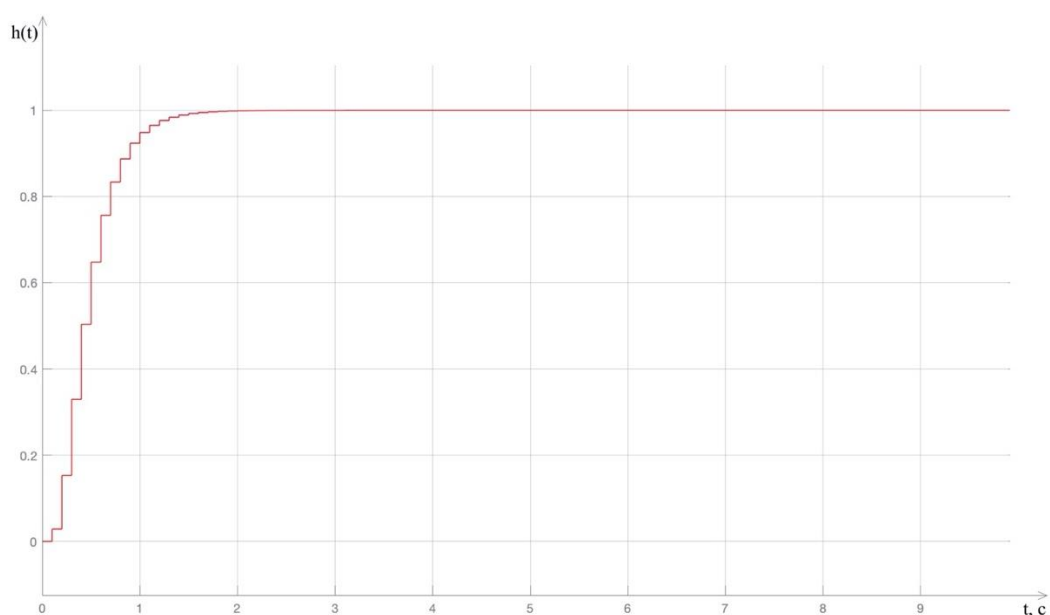


Рисунок 7.3 – Графіки перехідного процесу системи з цифровим регулятором, реалізованим за допомогою методу безпосередньої декомпозиції.

Порівнюючи графіки на рисунку 7.3 та рисунку 5.2 можна зробити висновок про ідентичність моделей.

## 7.2 Дослідження розробленого цифрового регулятора за допомогою мови програмування ST в середовищі CodeSYS

Використовуючи розрахунки з попереднього підрозділу було запрограмовано регулятор за допомогою мови програмування ST в середовищі CodeSYS [22].

Structured Text (ST) – мова програмування, що призначена для програмування промислових контролерів. Відповідає стандарту IEC 6113-3. За своєю структурою та синтаксисом найбільш схожий на мову програмування Pascal.

Підтримує необхідні типи даних. Цілочисельні типи: SINT (char), INT (short int), DINT (long), LINT (64 біт ціле), тощо. Дійсний типи: REAL (float), LREAL (double). Спеціальні типи BYTE(довжина терміну 8 бітів), WORD(16

бітів), DWORD(32 біти), LWORD(64 біти). Логічний тип BOOL - приймає значення TRUE або FALSE.

Лістинг програми представлено в Додатку А. Нижче наведено основні функції з лістингу програми.

// функція регулятора, заснованого на виборі бажаних передавальних функцій

$$y\_r[0] := 1.5024 * y\_r[1] - 0.6418 * y\_r[2] + 0.1394 * y\_r[3] + 1.666 * x\_r[0] - 3.2437 * x\_r[1] + 2.1192 * x\_r[2] - 0.412 * x\_r[3];$$

// функція передавальної функції

$$y\_m[0] := 1.947 * y\_m[1] - 1.272 * y\_m[2] + 0.2473 * y\_m[3] + 0.01722 * x\_m[1] + 0.04922 * x\_m[2] + 0.008586 * x\_m[3];$$

Код циклічний тому було обрано час 100мс. Вибираємо інструмент для виведення графіку на екран.



Рисунок 7.4 – Реалізація регулятора за бажаними функціями.

Як видно – графіки на рисунку 7.4 та 6.2 співпадають, а отже регулятор запрограмовано вірно.

## ВИСНОВОК

Метою даного дипломного проєкту було забезпечення комфортності руху електромобіля, яке досягається стабілізацією руху при змінних умовах дорожньої обстановки. Розглянуто існуючі рішення у світі електромобілів та обрано автомобіль з системою автопілот, яка дала можливість реалізувати автономну систему керування швидкістю електромобіля.

У дипломному проєкті розроблено структурну та функціональну схеми електроавтомобіля. Розроблено математичну модель цифрової системи та виконано перевірку на стійкість та якість.

У проєкті досліджувалися результати моделювання розроблених цифрових регуляторів за методами регуляторів, заснованих на виборі бажаних передавальних функцій та ПІД законів керування. Вибраний регулятор за бажаними передавальними функціями забезпечив наступну якість: час перехідного процесу  $t_{\text{пп}}$  - 1.1 с, перерегулювання 0% та помилку 0;

Для моделювання обраного регулятора в середовищі CodeSYS мовою програмування ST було проведено безпосередню декомпозицію системи. Результати досліджень наведено у відповідних графіках.

					ІА61.050БАК.005 ПЗ	Аркцш
						62
Зм.	Аркцш	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. HEVCars [Електронний ресурс]: Статистика купівлі електромобілів в Україні. - Назва з екрана. Доступ <https://hevcars.com.ua/reviews/skolko-elektrifitsirovannyih-avtomobiley-prodano-v-ukraine-k-1-yanvary-2019-goda/>
2. IT News [Електронний ресурс]: Структура електромобіля. - Назва з екрана. Доступ <http://information-technology.ru/sci-pop-articles/27-transport/6188-printsip-raboty-i-ustrojstvo-elektromobilya>
3. Верховна Рада України Офіційний веб-портал [Електронний ресурс] : Проект Закону про внесення змін до Податкового кодексу України та деяких законодавчих актів України щодо стимулювання розвитку галузі електричного транспорту в Україні. - Назва з екрана. Доступ : [http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4\\_1?pf3511=63677](http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=63677)
4. ION Cars [Електронний ресурс] : Склад акумулятора Tesla Model S . - Назва з екрана. Доступ <https://ion-cars.ru/battery-tesla-model-s-x/>
5. Ford Motor Company [Електронний ресурс] : Характеристики електромобіля Ford Ecosport-s. – Назва з екрана. Доступ : <https://www.ford.com/suvs-crossovers/ecosport/models/ecosport-s/>
6. Renault [Електронний ресурс] : Характеристики електромобіля Renault E-tech Hybride. – Назва з екрана. Доступ : <https://www.renault.fr/vehicule-hybride/e-tech-hybride.html>
7. Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG [Електронний ресурс] : Характеристики електромобіля Porsche Taycan – Назва з екрана. Доступ : <https://porsche.ua/models/taycan/taycan-models/taycan-turbo-s/>
8. BMW AG [Електронний ресурс] : Характеристики електромобіля BMW i8 Родстер. – Назва з екрана. Доступ : <https://www.bmw.ua/ru/all-models/bmw-i/i8-roadster/2017/technical-data.html#tab-0>
9. Tesla [Електронний ресурс] : Future of Driving. - Назва з екрана. Доступ [https://www.tesla.com/en\\_EU/autopilot?redirect=no](https://www.tesla.com/en_EU/autopilot?redirect=no)
10. Claudine Badue Self-Driving Cars : A Survey / Claudine Badue, Ranik

Guidolini, Raphael Vivacqua Carneiro, Pedro Azevedo, Vinicius Brito Cardoso, Avelino Forechi, Luan Jesus, Rodrigo Berriel, Thiago Paixao, Filipe Mutz, Lucas Veronese, Thiago Oliveira-Santos, Alberto Ferreira De Souza – 2019.

11. АвтоЦентр [Електронний ресурс] : Статистика щодо проведених тестів над електромобілями різних компаній. - Назва з екрана. Доступ : <https://www.autocentre.ua/news/u-kakogo-avtomobilya-samyj-luchshij-avtopilot-neozhidannye-rezultaty-testa-750962.html>

12. Tesla [Електронний ресурс] : Характеристики електромобіля Tesla Model X. - Назва з екрана. Доступ : <https://www.tesla.com/modelx>

13. Wikipedia [Електронний ресурс] : Класифікація рівнів автоматизованих систем - NHTSA levels. - Назва з екрана. Доступ : [https://en.wikipedia.org/wiki/Self-driving\\_car#Classification](https://en.wikipedia.org/wiki/Self-driving_car#Classification)

14. Autogeek [Електронний ресурс] : Принцип рекуперативне гальмування в електромобілях. - Назва з екрана. Доступ : <https://autogeek.com.ua/rekuperativnoe-tormozhenie-v-jelektromobiljah-kak-rabotaet-tehnologija-i-naskolko-realno-mozhno-uvlichit-zapas-hoda>.

15. Thomas Teixeira Map Memorization and Forgetting in the IARA Autonomous Car/ Thomas Teixeira, Filipe Mutz, Vinicius Cardoso, Lucas Veronese, Claudine Badue, Thiago Oliveira- Santos, Alberto F. De Souza - 2013

16. Tesla model s owner's manual // Tesla Motors. North America – 2020 p. – С. 120-167.

17. Поведенческое моделирование эффективности управления автотранспортными средствами: уч. / Дияб Абдаллах Саид Али Омар, «Белорусский национальный технический университет» г. Минск – 2013 – С 60.

18. Електронний журнал Експерт №4, Випуски 4-2016 - с. 48 - Цифровой потоп.

19. Н. И. Кульбашна, К. А. Сорока. Разработка модели выбора скорости движения водителем с учетом дорожной обстановки / Н. И. Кульбашна, К. А. Сорока // Восточно-Европейский журнал передовых технологий ISSN 1729-3774 - №81 – 2016

20. Репнікова Н.Б. Теорія автоматичного керування / Н.Б. Репнікова – К.: НТУУ «КПІ», 2011.

21. Репнікова Н.Б. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів напрямку 6.050201 «Системна інженерія». Теорія автоматичного управління - 2. Теорія цифрових систем управління. / Н.Б. Репнікова, А.В. Писаренко - К.: НТУУ «КПІ», 2012

22. Яланецький В.А., Юрчук Л.Ю. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Комп'ютерне моделювання процесів і систем» кредитного модулю №2 «Моделювання систем керування» 2019

					<i>IA61.0505AK.005 ПЗ</i>	Аркцш
						65
Зм.	Аркцш	№ докум.	Підпис	Дата		